

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

PŘEHLED JADERNÝCH REAKTORŮ SVĚTA

REVIEW OF WORLD NUCLEAR REACTORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

EVA BLAŽKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. HUGO ŠEN

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Eva Blažková

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Přehled jaderných reaktorů světa

v anglickém jazyce:

Review of world nuclear reactors

Stručná charakteristika problematiky úkolu: Práce má být rešeršní prací, která tvoří přehled typů a technických řešení jaderných reaktorů světa, které jsou významné z pohledu jaderné energetiky, ale také např. vybraných experimentálních jaderných reaktorů předních vědeckých pracovišť u nás i ve světě. Přehled má odrážet především současný stav.

Cíle bakalářské práce: 1) Vytvořit přehled typů jaderných reaktorů a rozdělit je podle vhodných kritérií 2) Popsat princip činnosti a konstrukci vybraných typů jaderných reaktorů 3) Vytvořit přehled energetických jaderných reaktorů a jejich zastoupení ve světě 4) Pojednat o reaktorech generace III. a IV.

Seznam odborné literatury: 1) J. Bečvář a kol. - Jaderné elektrárny, SNTL, Praha, 1978 2) Dubšek, F. - Jaderná energetika, skripta VUT v Brně 3) Internet

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Hugo Šen

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010. V
Brně, dne 3.11.2009

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá vytvořením přehledu typů jaderných reaktorů, jejich rozdělení a technické řešení vybraných typů. V práci je dále uvedeno zastoupení jednotlivých států, které mají jaderné reaktory a jejich postoj k jaderné energetice. Stručné pojednání o generaci III. a IV., co by mohla přinést energetice do budoucna. Vytvořená práce odráží především současný stav.

Klíčová slova : jaderný reaktor, jaderná elektrárna, jaderná reakce, jaderné palivo, energetika

ABSTRACT

This bachelor work is focused on creating an overview of nuclear reactor types, their categorization and engineering approach to particular designs. Furthermore, it also lists countries having nuclear reactors in possession and their standpoint towards nuclear energy in general. A brief summary of the third and fourth generation and their future energy potential is included as well. This work primarily reflects present-day status.

Keywords: nuclear reactor, nuclear power plant, nuclear reaction, nuclear fuel, power supply

Bibliografická citace:

BLAŽKOVÁ, E. *Přehled jaderných reaktorů světa*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Hugo Šen

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci *Přehled jaderných reaktorů světa* jsem napsala samostatně pod vedením Ing. Hugo Šena s použitím uvedené literatury nebo internetových odkazů.

V Brně 28.května 2010
Eva Blažková

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Hugovi Šenovi za jeho odborné vedení, cenné rady a připomínky.

OBSAH

1 ÚVOD	11
1.1 AKTUÁLNÍ VOLBA ELEKTROENERGETIKY – JÁDRO	11
2 SPECIFIKACE JADERNÉ ENERGETIKY	12
2.1 HISTORIE AŽ SOUČASNOST JADERNÉ ENERGIE	12
2.2 KLASIFIKACE JADERNÝCH ELEKTRÁREN V ČR	13
2.2.1 JADERNÁ ELEKTRÁRNA DUKOVANY	15
2.2.2 JADERNÁ ELEKTRÁRNA TEMELÍN	16
2.3 JADERNÝ REAKTOR A Z ČEHO SE SKLÁDÁ	17
2.4 VÝROBA ENERGIE – ŠTĚPNÁ ŘETĚZOVÁ REAKCE	19
3 JADERNÉ REAKTORY	20
3.1 KONSTRUKCE JADERNÝCH REAKTORŮ	20
3.2 TYPY JADERNÝCH REAKTORŮ	21
3.2.1 TEPELNÉ JADERNÉ REAKTORY	21
3.2.1.1 JADERNÉ REAKTORY CHLAZENÉ VODOU	21
3.2.1.1.1 TLAKOVODNÍ REAKTORY	21
3.2.1.1.2 VARNÉ REAKTORY	23
3.2.1.2 JADERNÉ REAKTORY CHLAZENÉ PLYNEM	25
3.2.2 RYCHLÉ MNOŽIVÉ REAKTORY	27
4 ZASTOUPENÍ JADERNÝCH REAKTORŮ VE SVĚTĚ	30
5 III. a IV. GENERACE JADERNÝCH REAKTORŮ	39
6 ZÁVĚR	45
7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	46
8 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	48
9 SEZNAM PŘÍLOH	49

1 ÚVOD

1.1 AKTUÁLNÍ VOLBA ELEKTROENERGETIKY – JÁDRO

Svět má v současnosti dva hlavní globální problémy – přístup k energetickým zdrojům a negativní vliv emisí tzv. skleníkových plynů na změny klimatu na Zemi. Oba problémy by mohla řešit jaderná energetika, o kterou se v současné době zvyšuje zájem především v souvislosti s kolísajícími cenami cen fosilních paliv, snahami jednotlivých zemí o energetickou nezávislost (především na Rusku) a v souvislosti s bojem proti již zmiňovaným změnám klimatu. Jaderné elektrárny prakticky neprodukují žádné skleníkové plyny (CO_2) a patří všude ve světě mezi nejlevnější energetické zdroje.

Pro rozvoj jaderné energetiky u nás i ve světě hovoří i dostatek surovin na výrobu paliva. Světové zásoby ekonomicky dostupných jaderných paliv mohou bez přepracování paliva vystačit na 85 let, s recyklací i na 2,5 tisíce let. Zásoby lithia pro další generaci fúzních reaktorů dokonce by mohly vystačit i na 46 milionů let. [1]

Jaderný reaktor je zařízení, ve kterém probíhá řetězová štěpná jaderná reakce, kterou lze kontrolovat a udržovat ve stabilním běhu, na rozdíl od jaderné exploze. Princip jaderných reaktorů je v podstatě jednoduchý, jejich konstrukce však velmi složitá. Obecně je většina reaktorů velká nádoba, která musí odolávat vysokým tlakům, teplotám a intenzivnímu toku neutronů. V jaderných elektrárnách ve světě v současné době pracují jaderné reaktory řady různých typů, kterými se budu dále zabývat v mojí práci. [2]

2 SPECIFIKACE JADERNÉ ENERGETIKY

2.1 HISTORIE AŽ SOUČASNOST JADERNÉ ENERGIE

V Berlíně roku 1938 byl proveden první úspěšný pokus s jaderným štěpením.

V řadě zemí se během 2. světové války rozběhl jaderný program. V podzemí Chicagské univerzity proběhla 2. prosince 1942 v reaktoru CP-1 první řízená řetězová štěpná reakce.

Roku 1951 v USA byl vůbec poprvé využit jaderný reaktor k výrobě elektřiny. Calder Hall v Velké Británii byla považována za první komerční jadernou elektrárnu, však za první jadernou elektrárnu bývá označována elektrárna Obninsk spuštěna v Sovětském svazu v roce 1954.

70. a 80. léta byla pro jadernou energetiku rychle se rozvíjejícím obdobím, protože se zvyšovalo využití jaderné energie pro komerční účely po překonání ekonomických a technologických problémů.

Od konce 80. let je nárůst mnohem pozvolnější. Proti využití jaderné energie se v mnoha zemích zvedla vlna odporu, založená na obavách z nehody, k čemuž přispěla i největší havárie americké jaderné elektrárny Tree Mile Island, která se stala 28. března 1979. Dále vznikala také strach z radiace a roli hrál i relativní dostatek energie z fosilních zdrojů. V současnosti se zájem o využití jaderné energie znova zvyšuje především v souvislosti s kolísajícími cenami fosilních paliv, snahou o energetickou nezávislost jednotlivých zemí a v souvislosti s bojem proti globálnímu oteplení. [3]

V současné době je celkem 29 zemí, které provozují 436 jaderných reaktorů. Jaderné elektrárny pokrývají kolem 15 % z celkové světové spotřeby elektrické energie. [4] V české republice pochází z jaderných zdrojů 31 % elektřiny, která je produkována ve dvou jaderných elektrárnách s šesti jadernými reaktory. [1]



Obr. 2–1 Graf spotřeby elektřiny v ČR – dlouhodobý vývoj (1919–2008) [5]



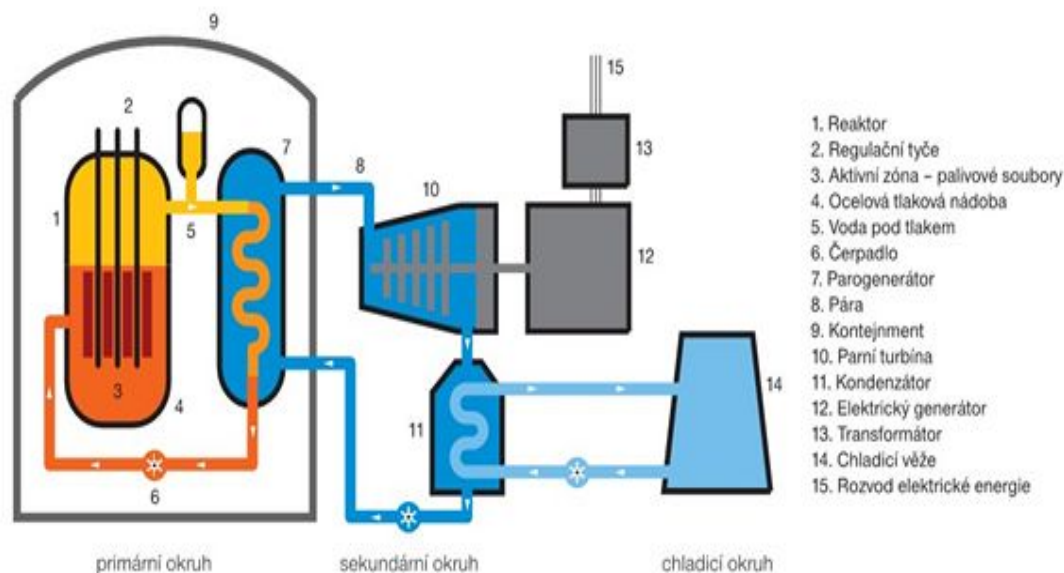
Obr. 2–2 Graf spotřeby energie v ČR (1993–2008) [5]

2.2 KLASIFIKACE JADERNÝCH ELEKTRÁREN V ČR

V České republice pracují v současné době dvě jaderné elektrárny:

- jaderná elektrárna Dukovany
- jaderná elektrárna Temelín

Princip uspořádání jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem je stejný pro obě elektrárny.



Obr. 2–3 Princip uspořádání jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem [6]

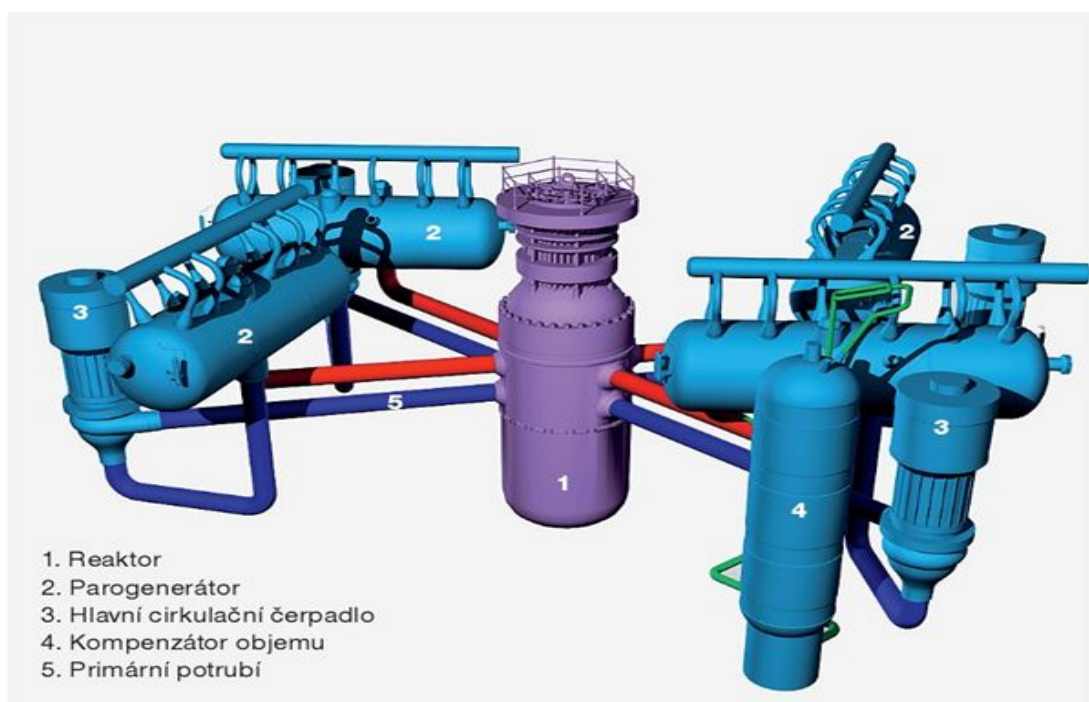
Primární okruh

Primární okruh je zjednodušeně řečeno systémem technických zařízení, která umožňují získávat tepelnou energii z jaderného paliva prostřednictvím řízené štěpné reakce, nepřetržitě tuto energii pomocí chladiva odvádět a přeměňovat na formu tepelné energie využitelnou v parní turbíně. Srdcem primárního okruhu je jaderný reaktor. Na něj jsou napojeny cirkulační smyčky, kterými proudí chladicí voda odvádějící teplo vzniklé při štěpení jader uranu v aktivní zóně reaktoru.

Celý okruh vyrobený z oceli je neprodyšně oddělen od okolního prostředí stěnami železobetonové ochranné obálky – kontejnment. [6]

Základními zařízeními tohoto okruhu jsou:

- jaderný reaktor
- parogenerátory
- hlavní cirkulační čerpadla
- cirkulační potrubí primárního okruhu
- kompenzátor objemu



Obr. 2–4 Prostorové uspořádání primárního okruhu [7]

Sekundární okruh

V sekundárním okruhu jaderné elektrárny se mění tepelná energie páry v mechanickou energii rotoru parní turbíny. Turbína ve strojovně jaderné elektrárny je v podstatě rotační tepelný stroj. Rotor turbíny je spojen s generátorem, kde se přeměňuje kinetická energie rotoru na energii elektrickou. V kondenzátorech pod turbínou pára na titanových trubkách kondenzuje a jako voda se vrací do parogenerátoru. Teplá voda z kondenzátoru je odváděna do chladících věží. [6]

Základními zařízeními tohoto okruhu jsou:

- turbína a generátor
- kondenzátor
- kondenzátní a napájecí čerpadla
- regenerační ohříváky

Terciární okruh

Úkolem terciárního okruhu je vytvořit v kondenzátoru co největší podtlak využitelný turbínou, aby účinnost turbíny byla co nejvyšší. Čím nižší je teplota chladící vody v terciárním okruhu, tím vyšší je podtlak v kondenzátoru.

Terciární okruh se skládá především z chladících věží, objemových čerpadel, potrubí a kanálů chladící vody. Teplá voda z trubek kondenzátoru je vedena do chladící věže, kde se pomocí sprchových hadic rozstříkuje z výšky 10 m až 20 m, v kapkách padá dolů a ochlazuje se proudícím vzduchem. Část padající vody se přitom odpaří. Vlhký teplý vzduch při tom stoupá vzhůru, chladí se venkovním vzduchem a vodní pára v něm obsažená zkondenzuje. [6]

2.2.1 JADERNÁ ELEKTRÁRNA DUKOVANY

V jaderné elektrárně Dukovany pracují tlakovodní reaktory VVER 440/213, které jsou dalším vývojovým typem VVER 440/230, kde byla výrazně zlepšena bezpečnost konstrukce. Elektrárna je uspořádána do dvou hlavních bloků a v každém z nich jsou dva reaktory včetně dalších nezbytných příslušenství např. strojovna s turbínami a generátory. Rozměry jaderného reaktoru VVER 440 typu 213 jsou 24 m na výšku, 3,56 m v průměru a váží 215 t. Tepelný výkon každého ze čtyř reaktorů je 1375 MW.

Cyklus výměny paliva u těchto typů reaktorů je tříletý což znamená, že se každý rok vyměňuje 1/3 paliva. Palivem pro tento typ jaderného reaktoru je obohacený uran ve formě oxidu uraničitého (UO_2). Přírodní uran je složen z izotopů. Pro štěpení tepelnými neutrony je vhodný pouze izotop ^{235}U . V aktivní zóně jaderného reaktoru je uspořádáno jaderné palivo a systém pro kontrolu štěpné reakce. VVER 440/213 má složení aktivní zóny z 312 palivových kazet a 37 regulačních tyčí. Každá kazeta obsahuje 126 palivových proutků, v nichž jsou hermeticky uzavřeny tablety jaderného paliva. Chladicí voda proudí okolo palivových proudků a odvádí teplo z aktivní zóny.

Jaderný reaktor VVER 440 má použito pro havarijní, kompenzační a regulační systém reaktoru absorpční tyče kombinované s palivovou kazetou. Regulační orgán je v horním souboru reaktoru a je vyroben z absorpčního materiálu. Dolní část souboru tvoří palivové tyčové články jejichž dolní konce jsou opatřeny tlumícím zařízením, které slouží ke zbrždění v případě nouzového odstavení kazety volným pádem.

Součástí tlakovodních ale i varných reaktorů je sekundární havarijní ochrana vstřikováním kapalného rozpustného absorbátoru, např. kyselina boritá (H_3BO_3) do chladiva primárního okruhu.

Jaderný reaktor VVER 440/213 patří mezi nejrozšířenější typ tlakovodních reaktorů v Evropě a Rusku. Je kladen velký důraz na bezpečnost po mnoholetých zkušenostech pro tento typ, ale nejen pro něj. Modernizace nejen reaktoru ale i celé elektrárny Dukovany probíhá za provozu. [8, 9]



Obr. 2–5 Jaderná elektrárna Dukovany [6]

2.2.2 JADERNÁ ELEKTRÁRNA TEMELÍN

V jaderné elektrárně Temelín byly zvoleny tlakovodní reaktory VVER 1000 typu V 320 s tepelným výkonem reaktoru 3000 MW. Původně byly projekty elektrárny naplánovány na čtyři reaktorové bloky, ale v roce 1990 vláda rozhodla, že budou dokončeny pouze první dva. Každý blok má instalovaný výkon 981 MW. Kontejnment nebo-li ochranná obálka kolem samotného reaktoru slouží k ochraně před katastrofickými scénáři a je navrhována tak, aby i vážná havárie jaderného reaktoru zabránila úniku radioaktivního prachu a dalších radioaktivních látek. Válcová část ochranné obálky v temelínské elektrárně má výšku 38 m a vnitřní průměr 45 m. Kontejnment je vystavěn z oceli a betonu a její tloušťka stěny je 1,2 m a ocelové výstelky 8 mm.

Cyklus výměny paliva je čtyřletý, což znamená, že se každý rok vymění 41 až 42 palivových souborů za čerstvé. Speciální zavážecí stroj, který umožňuje výměnu paliva je umístěn nad bazénem skladování použitého paliva.

Obohacení paliva je pro temelínskou elektrárnu maximálně 4 % ^{235}U . VVER 1000 V 320 má složení aktivní zóny z 163 palivových souborů a 1 soubor v sobě obsahuje 312 palivových proutků. Palivová vsázka váží okolo 92 t.

Jaderný reaktor VVER 1000 má i další vývojové typy, které se řadí mezi nejvyspělejší III. generaci. Jsou to typy s označením VVER 1000 V 392 a V 466. VVER 1000 V 466 je i právě uvažovaným typem pro dostavění dalších bloků v jaderné elektrárně Temelín. Nové typy mají zjednodušenou konstrukci reaktoru a tím jsou i bezpečnější. Tento typ je svým letitým vylepšováním porovnatelný s nejlepšími jadernými reaktory světa, ať už po stránce bezpečnostní tak technické. [8, 9]



Obr. 2–6 Palivový soubor reaktoru VVER 1000 [4]

2.3 JADERNÝ REAKTOR A Z ČEHO SE SKLÁDÁ

Jaderný reaktor

Jaderný reaktor je technické zařízení, které je tvořeno tlakovou nádobou s odnímatelným víkem pod kterým je aktivní zóna. V aktivní zóně je uspořádáno jaderné palivo a systém pro řízení štěpné reakce. Zde také dochází ke štěpení jader paliva a k přeměně jaderné energie na energii tepelnou. Jaderný reaktor musí obsahovat jaderné palivo, chladivo, moderátor u některých typů, konstrukční materiály a řídicí systémy. Tyto veškeré komponenty slouží k udržení řízené štěpné řetězové reakce a umožňuje plynule odvádět tepelnou energii uvolňovanou při štěpení.



Obr. 2–7 Jaderný reaktor [6]

Palivo

Palivo bývá sestaveno do palivových proutků, které jsou složeny z malých tablet (pelet), které jsou poskládány na sebe. Palivový proutek má průměr 9 mm. Tyto proutky se sváží do svazku, který tvoří palivovou kazetu. Povlakem ze speciální slitiny jsou palivové proutky chráněny, aby zaručily předání tepla z paliva chladivu a zároveň aby nepropustily radioaktivní štěpné produkty. Povlak bývá nejčastěji na bázi zirkonia. Palivo se vkládá do aktivní zóny, kde probíhá štěpná reakce. U některých typů reaktorů je palivo ve formě koulí, které se volně spouští do aktivní zóny.

Moderátor

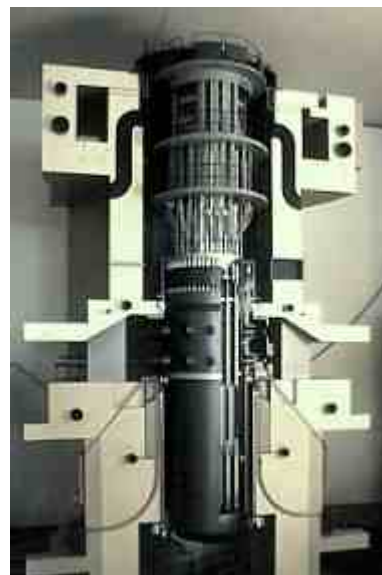
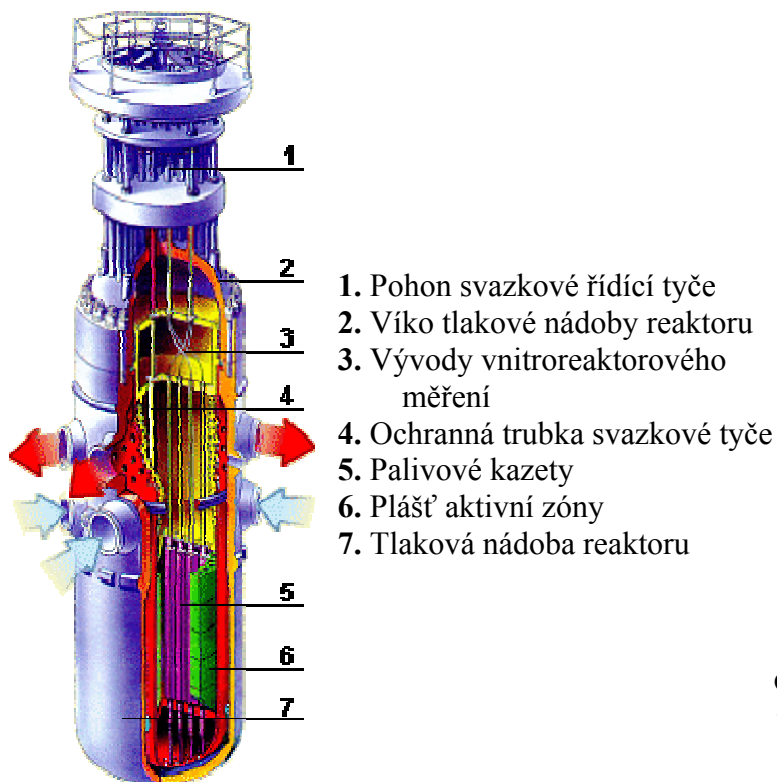
Moderátorem je médium, které je v jaderných reaktorech, kde štěpení probíhá pomalými neutrony, zpomaluje neutrony a bývá jím nejčastěji voda. Moderátor však může být i grafit, který byl použit při první řízené řetězové štěpné reakci nebo těžká voda (D_2O). Jaderné reaktory, kde probíhá štěpení na bázi rychlých neutronů moderátor chybí. U těchto reaktorů je palivem obohacený uran nebo plutonium.

Absorbátor

Absorbátor se nachází v aktivní zóně, kam se vkládá podobně jako palivo. Palivové kazety mohou být rozděleny na dvě části a to tak, že v dolní se nachází palivo a v horní absorbátor. Štěpná reakce nebo-li výkon reaktoru se pak reguluje výškou vytažení kazet do aktivní zóny. Havarijní tyče, které jsou vysunuty nad aktivní zónou, jsou připraveny pro okamžité zastavení výkonu reaktoru. Jsou připevněny pomocí elektromagnetů, které v případě, že začne havarijní signál, vypnou a tyče spadnou volným pádem do aktivní zóny, čímž štěpnou reakci zastaví.

Chladičem

Je to médium, které odvádí teplo z palivových článků reaktoru. Při štěpení jader odletují nová jádra (štěpné úlomky), narážejí do okolních jader a svou kinetickou energii tak způsobují zahřívání okolí. Teplonosné médium odvádí toto teplo tam, kde ho můžeme využít. Štěpící se materiál je potřeba neustále ochlazovat, aby nedošlo k roztavení povlaku na palivovém proutku a úniku štěpných produktů. Jako chladivo se nejlépe osvědčuje obyčejná voda, těžká voda, oxid uhličitý, helium, sodík a některé soli nebo slitiny. Reaktory mohou mít jeden nebo více chladicích okruhů.



Obr. 2–9 Model reaktoru v informačním centru Jaderné elektrárny Dukovany. [10]

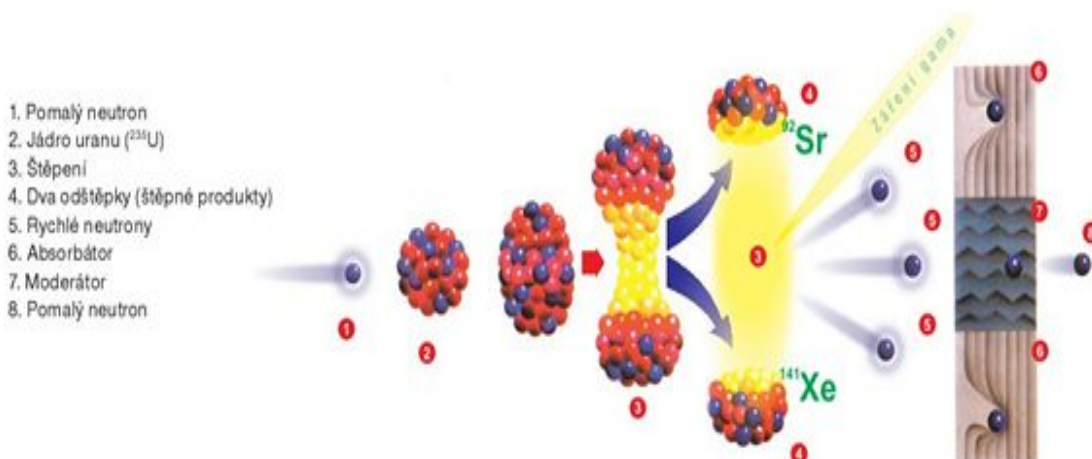
Obr. 2–8 Řez jaderným reaktorem VVER [10]

Nejjednodušší schéma jaderné elektrárny je jednookruhové. Přímou v reaktoru se varem vody vytvoří pára, která se vede k turbíně. Zde koná užitečnou práci a po ochlazení v kondenzátorech se vrací zpět do reaktoru. Celý cyklus se stále opakuje. Je to velmi jednoduchý postup, ale má jednu nevýhodu, voda z reaktoru může být radioaktivní, může s sebou nést stopová množství aktivovaných korozních produktů. S touto vodou se dostává do styku velká část strojního vybavení elektrárny, hlavně turbína, kondenzátory a čerpadla. Proto se tento způsob u nových generací elektráren již neuznává. Ve většině zemí, včetně České republiky, se provozují dvouokruhové elektrárny. Voda z reaktoru koluje v tzv. primárním okruhu. Trubky primárního okruhu procházejí výměníkem, tzv. parogenerátorem, kde ohřívají vodu sekundárního okruhu. Teprve v něm vzniká pára, která se vede k turbíně a do kondenzátorů. Sekundární chladicí okruh vůbec nepříjde do styku s reaktorem. Některé elektrárny se speciálními typy reaktorů užívají dokonce tříokruhové schéma provozu. Jsou to například rychlé množivé reaktory, využívající jako chladivo v primárním okruhu tekutý kov. [10]

2.4 VÝROBA ENERGIE – ŠTĚPNÁ ŘETĚZOVÁ REAKCE

Energii, kvůli které jsou vyvíjeny stále dokonalejší jaderné reaktory, získáváme štěpnou řetězovou reakcí. Při jaderné reakci naráží neutron do jádra uranu, který se během štěpení rozděluje na dvě části, kterým se říká odštěpky a díky elektrostatickému odpuzování se od sebe rozletí velkou rychlostí. Pohybová energie, která se mění na energii tepelnou, vzniká narážením na okolní atomová jádra a tím i způsobují, že se tyto dvě části jádra zpomalí. Současně při rozdělení jádra se uvolní i 2 – 3 nové neutrony s velkou energií. Aby se zvýšila pravděpodobnost, že dojde k dalšímu štěpení, tak se neutrony zpomalují pomocí moderátoru. Nejlépe se neutron zpomalí srážkami s jádry lehkých prvků, což je například vodík obsažený ve vodě, kterým předá část své energie. Zpomalený neutron naráží do dalších jader uranu a tím vzniká řetězová reakce.

Řetězová reakce musí být regulována, aby počet volných neutronů se stále nezvyšoval. Pokud by tomu tak nebylo, došlo by k exponenciálnímu růstu štěpných reakcí a k neřízené štěpné reakci, která by vedla k nekontrolovatelnému uvolnění velkého množství energie s následnou destrukcí aktivní zóny a celého reaktoru. Nadbytečné neutrony jsou zachycovány vhodnými absorbátory. Jádra bóru bývají používány jako absorbátor a to tak, že se ve formě kyseliny borité přidávají do chladiva v primárním okruhu. Neutrony také regulují regulační tyče, které se buďto zasunují nebo vysunují z aktivní zóny reaktoru.



Obr. 2–10 Řízená štěpná reakce [7]

3 JADERNÉ REAKTORY

Jaderný reaktor můžeme v podstatě charakterizovat fyzikálními principy na nichž je založena jeho funkce. Dle toho se reaktory dělí na dvě základní skupiny :

- reaktory tepelné, v nichž dochází ke štěpení převážně tepelnými neutrony
- reaktory rychlé, v nichž se štěpení děje rychlými neutrony.

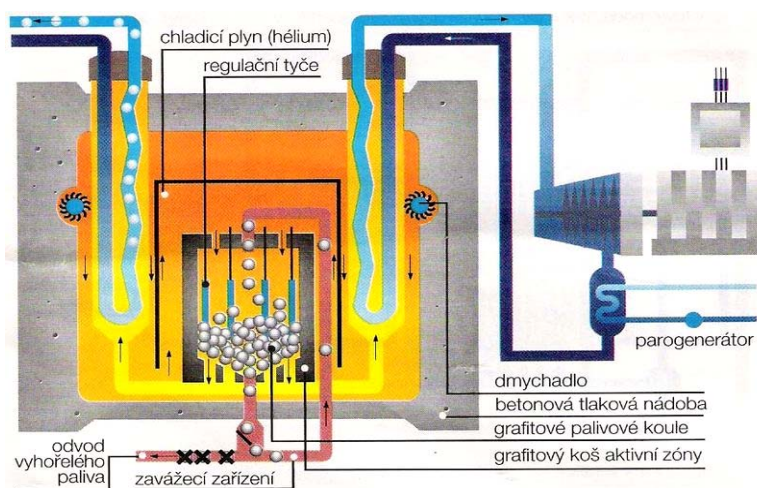
3.1 KONSTRUKCE JADERNÝCH REAKTORŮ

Princip reaktorů je v podstatě jednoduchý, jejich konstrukce však velmi složitá. Provedení závisí na mnoha ukazatelích: typu paliva, chladiva a moderátoru, na uvažovaném provozním tlaku a teplotě a dalších aspektech. Reaktorová nádoba bývá zpravidla vystavována velkým tlakům, teplotám a intenzivnímu toku neutronů. Proto i její výroba je velmi náročná a použité materiály musí být speciálně čisté a odolné.

Základní konstrukce jsou:

Reaktor s tlakovodní nádobou – používá se tam, kde objem paliva je přibližně stejně velký jako objem moderátoru. Reaktorová nádoba je vyrobena ze speciální oceli, váží několik set tun, průměr bývá okolo 7 metrů a výška až 23 metrů.

Reaktor s tlakovodními trubkami – je vhodný v případech, kde objem moderátoru je mnohem větší než objem paliva. Palivo je umístěno v samostatných kanálech obklopených bloky moderátoru. Celý systém je umístěn v betonové tlakové nádobě v případě typu jaderného reaktoru HTGR, ale také může být bez betonové tlakové nádoby jako třeba u typu CANDU nebo RBMK.



Obr. 3-1 Reaktor HTGR (koncepte s betonovou tlakovou nádobou) [12]

Reaktor s nádobou ze železobetonu – při konstrukci jaderných reaktorů používajících ke zpomalování neutronů grafit, by pro vyšší výkony musely reaktorové nádoby být takových rozměrů, že by se prakticky nedaly vyrobit ani převést na místo stavby elektrárny. Proto se reaktorové nádoby ze železobetonu budují přímo na staveništi. Vnitřní rozměry železobetonových nádob dosahují desítek metrů. Jsou velmi odolné vůči tlaku, což znamená i velmi bezpečné. [11]

3.2 TYPY JADERNÝCH REAKTORŮ

Ve světě dnes pracuje okolo 440 jaderných reaktorů. Jsou nejrůznějších typů s různou četností jejich zastoupení.

3.2.1 TEPELNÉ JADERNÉ REAKTORY

Vývoj tepelných jaderných reaktorů trvá již několik desetiletí a při něm bylo zvažováno asi 50 reaktorových typů. U většiny z nich se však skončilo u projektů popřípadě u výzkumného prototypu malého výkonu. Postupně se vytvořily tři velké skupiny reaktorů, které se staly základnou budování velké energetiky :

- 1 – reaktory chlazené vodou (H_2O , D_2O)
- 2 – reaktory chlazené plynem (CO_2 , He)

Skupiny se vzájemně odlišují výkonovým zatížením aktivní zóny reaktoru, udávaným v MW/m^3 objemu zóny.

Základní roli při jejich výrobě sehraává i úroveň průmyslu realizujícího tak technicky náročné dílo. [9]

3.2.1.1 JADERNÉ REAKTORY CHLAZENÉ VODOU

Reaktory chlazené vodou mohou být chlazeny jak obyčejnou lehkou vodou, tak i těžkou vodou. Mohou být provedeny jako tlakovodní nebo varné. Tepelná energie z tlakovodního reaktoru je předávána v parním generátoru prostřednictvím tlakové vody primárního okruhu vodě a z ní vyrobené parní turbíně, kdežto v případě varného reaktoru se pára vyrábí přímo v reaktoru. [9]

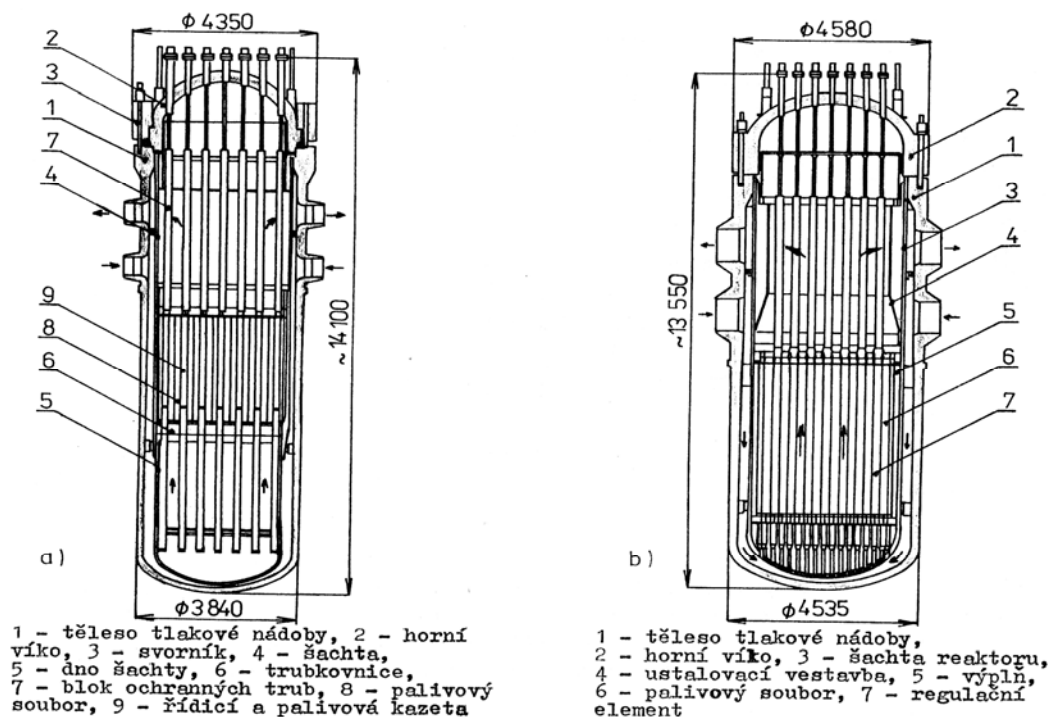
3.2.1.1.1 TLAKOVODNÍ REAKTORY

PWR, VVER

(Pressurized light-Water moderated and cooled Reactor, Vodo-Vodjanov Energetičeskij Reaktor)

Tlakovodní reaktor PWR nebo ruský typ VVER je dnes ve světě nejrozšířenějším typem jaderného reaktoru, pracuje jich asi 265, což je 57 % ze všech světových energetických reaktorů. Původně byl vyvinut v USA, později koncepci převzalo Rusko. Ruská koncepce jaderných elektráren typu VVER 440 (Obr. 3–2 a) využívá šesti cirkulačních smyček. U vyšší výkonové jednotky VVER 1000 (Obr. 3–2 b) se snížil počet smyček na čtyři. Tomto uspořádání je zvětšen průměr potrubí smyčky na Js 1000.

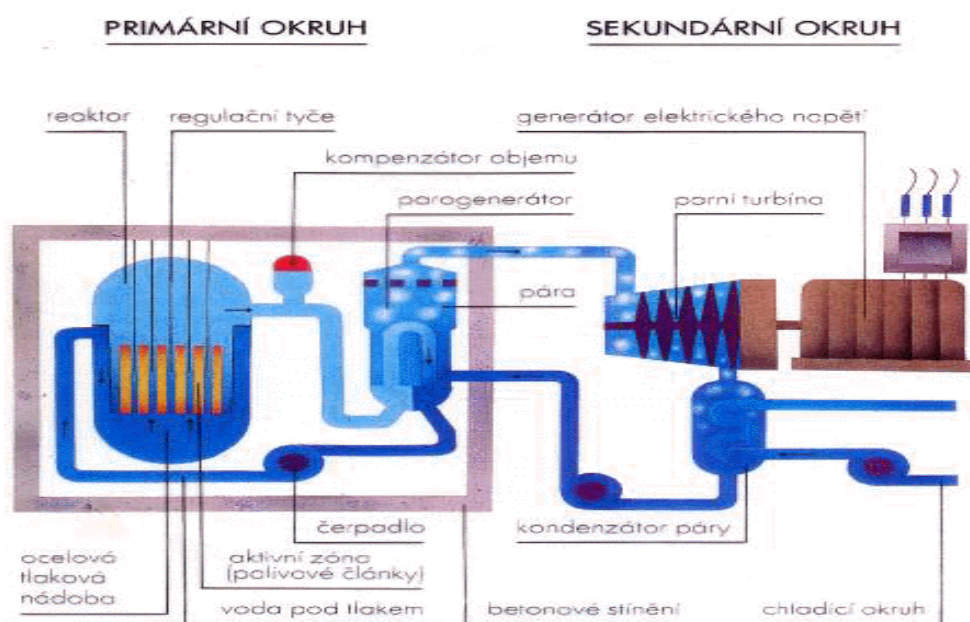
Stejné reaktory pro svou vysokou bezpečnost jsou používány i pro pohonu jaderných ponorek. Palivem je obohacený uran ve formě tabletek oxidu uraničitého uspořádaných do palivových tyčí. Moderátorem a i chladivem je obyčejná voda. Proudí v primárním okruhu pod velkým tlakem 15,7 MPa a o teplotě 324 °C. Parogenerátor ohřívá vodu sekundárního okruhu, tam se mění na páru a pohání turbínu. [9, 11]



Obr. 3–2 Technologické schéma reaktoru a) VVER 440
b) VVER 1000 [9]

Charakteristické rysy

- použití obohaceného paliva ve formě UO_2 (nebo PuO_2)
- dobře známé tepelné a fyzikální vlastnosti a technologie lehké obyčejné vody
- relativně jednoduchý chladicí systém
- korozní a erozní problémy zvětšující se s tlakem, teplotou a rychlostí vody v primárním okruhu reaktoru
- vysoká stabilita reaktoru daná velkou hodnotou záporného teplotního koeficientu reaktivity [9]



Obr. 3–3 Reaktor VVER (PWR) [13]

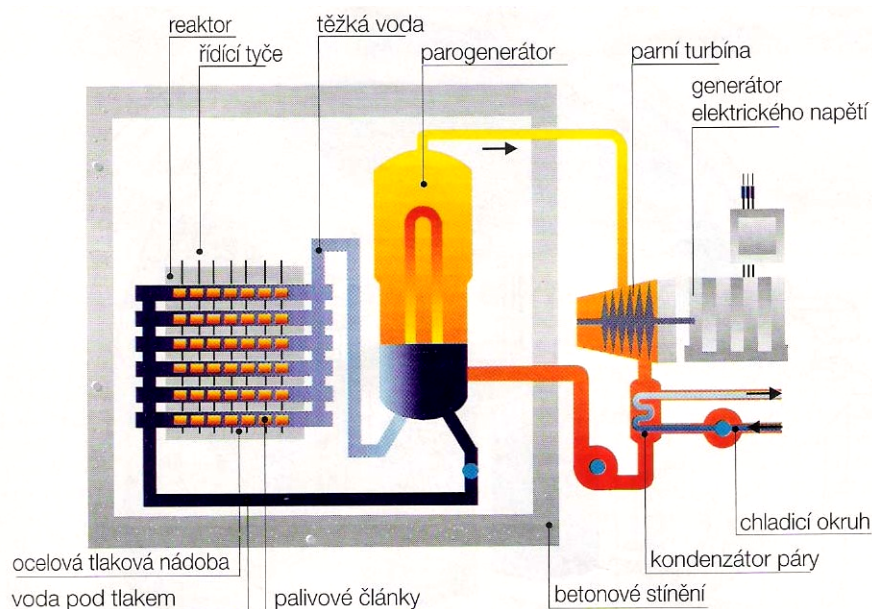
CANDU

(CANadian Deuterium Uranium)

Zvláštní odnoží reaktorů tlakovodních jsou reaktory chlazené tlakovou těžkou vodou, moderované též těžkou vodou a udržované na nízké teplotě a pod nízkým tlakem.

Reaktor byl vyvíjen v Kanadě a byl exportován do Indie, Pákistánu, Argentiny, Koreje a Rumunska. Dnes pracuje asi 44 takových reaktorů. Palivem je přírodní uran ve formě oxidu uraničitého, chladivem a moderátorem je těžká voda (D_2O).

Aktivní zóna je v nádobě tvaru ležícího válce, která má v sobě vodorovné průduchy pro tlakové trubky a má rozměry 7 m v průměru a 5,9 m na výšku při výkonu 600 MW. Tlak těžké vody v reaktoru je 9,3 MPa. Těžkovodní moderátor v nádobě musí být udržován na nízké teplotě 60°C, neboť moderační schopnost se snižuje se zvyšující se teplotou a je oddělen od chladicí těžké vody. Těžká voda z prvního chladicího okruhu předává své teplo obyčejné vodě v parogenerátoru, odkud se vede pára na turbínu. Teplota těžké vody na výstupu z reaktoru je 305 °C. [11]



Obr. 3–4 Reaktor CANDU [14]

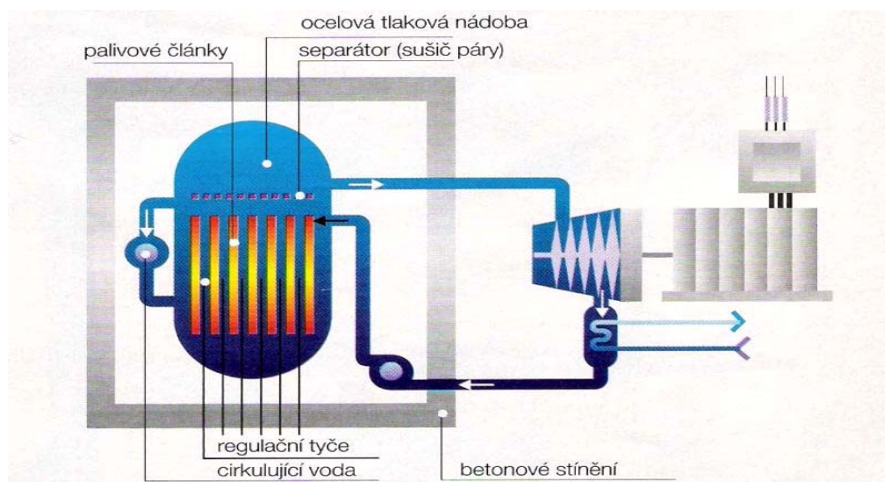
3.2.1.1.2 VARNÉ REAKTORY

BWR

(Boiling Water Reactor)

BWR je varný reaktor, který je druhým nejrozšířenějším typem jaderného reaktoru. Těchto reaktorů pracuje na světě asi 94, což je asi 21 % celkového počtu. Palivem je mírně obohacený uran izotopem ^{235}U na 2,1 až 2,6 % ve formě válečků oxidu uraničitého uspořádaných do palivových tyčí. Výměna paliva probíhá při odstaveném reaktoru zpravidla jednou za 1 až 1,5 roku. Aktivní zóna, která má při výkonu 1000 MW rozměry 4,5 m v průměru a 3,7 m na výšku je podobná aktivní zóně tlakovodního reaktoru. Moderátorem i chladivem je obyčejná voda, která má tlak vody 7 MPa. Teplota páry na výstupu z reaktoru je 286 °C.

Voda se ohřívá až do varu přímo v tlakové nádobě a v horní části reaktoru se hromadí pára. Pára se zbaví vlhkosti a žene se přímo k turbíně. Nelze však při tom zaručit, že se parní turbína nestane radioaktivní. Elektrárny s reaktory BWR jsou tedy jednokruhové. [11]

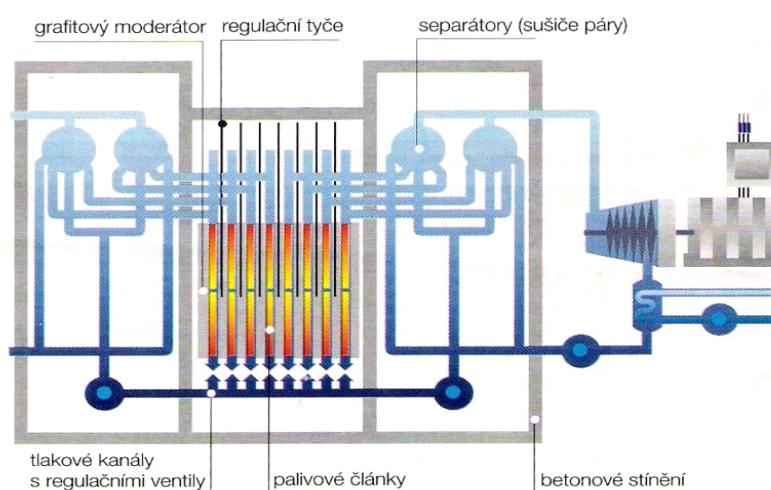


Obr. 3–5 Reaktor BWR [15]

RBMK

(Reaktor Bolšoj Moščnosti Kanalnyj)

Reaktor typu RBMK známá je též zkratka LWGR (Light-Water-cooled Graphite-moderated Reactor), se používá výhradně na území bývalého SSSR. Tohoto typu byl i reaktor první jaderné elektrárny v Obnisku i reaktor v Černobylu; jeho podstatnou nevýhodou je nestabilita spočívající v tom, že když se začne přehřívat, vyvaří se z něj voda a jaderná reakce se tím ještě zrychlí, protože v něm bude stále přítomen grafitový moderátor. Další reaktory tohoto typu se již nestaví. Palivem je přírodní, nebo slabě obohacený uran izotopem ^{235}U na 1,8 % ve formě oxidu uraničitého pro reaktor o výkonu 1000 MW. Palivové tyče jsou uloženy v kanálech, kudy proudí chladivo – obyčejná voda. V tlakových kanálech přímo vzniká pára, která po oddělení vlhkosti pohání turbínu. Moderátorem je grafit, který obklopuje kanály s parovodní směsí, kterých je 1693. Tlak nenasycené páry je 6,9 MPa a teplota parovodní směsi na výstupu z reaktoru je 284 °C. [11]



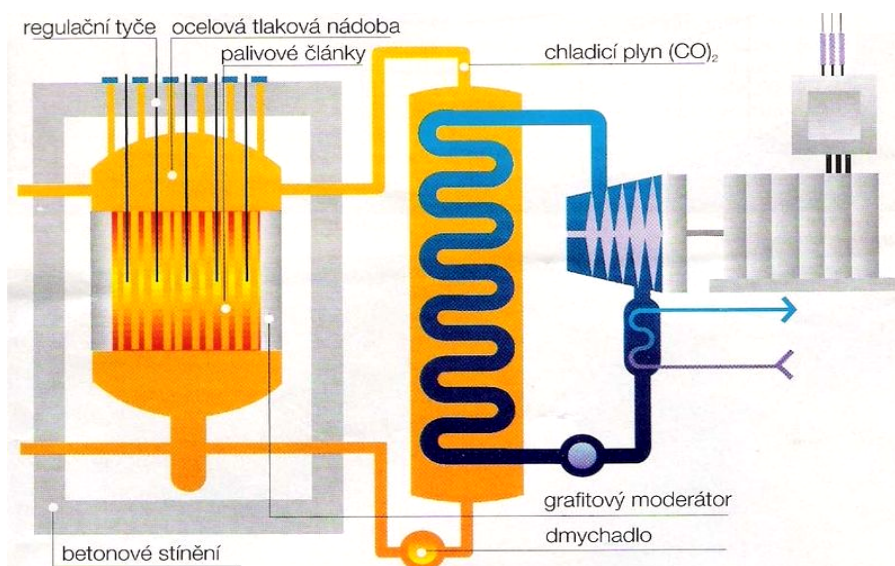
Obr. 3-6 Reaktor RBMK [16]

3.2.1.2 JADERNÉ REAKTORY CHLAZENÉ PLYNEM

MAGNOX

(Gas Colled, Graphite Moderated Reactor)

Ve své době tento typ jaderného reaktoru zaznamenal největší rozvoj mezi plynem chlazenými reaktory. V dnešní době už tento typ spíše dosluhuje a dále se nevyrábí. Magnox se používá v Japonsku a ve Velké Británii, kde nejvíce přispěli k jeho vývoji a také byl použit v první jaderné elektrárně Calder Hall. Palivové články ve tvaru tyčí jsou z přírodního kovového uranu s obsahem 0,7 % izotopu ^{235}U , které jsou pokryty oxidem hořčíku. Aktivní zóna, kam se vkládají palivové tyče nad sebe do několika tisíc svislých kanálů v grafitovém bloku, který je moderátorem, je uzavřena v kulové ocelové tlakové nádobě se silným betonovým stíněním, kterým je obestavěna. Výměna paliva probíhá za provozu. Rozměry aktivní zóny jsou 14 m v průměru a 8 m na výšku s výkonem 600 MW. Chladicí plyn je oxid uhličitý (CO_2), ten proudí kanály kolem palivových tyčí, kde je ohříván a dále je veden do parogenerátorů, kde předává svoje teplo vodě sekundárního okruhu. Tlak chladicího plynu je 2,75 MPa. Ochlazený plyn vrací dmychadla zpět do reaktoru. Pára vzniklá v parogenerátoru pohání turbínu, která je připojená na generátor elektrického napětí. [9, 11]

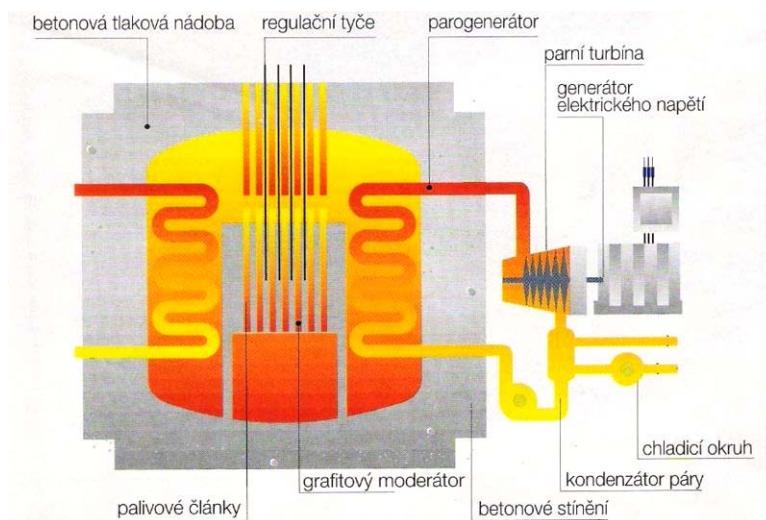


Obr. 3-7 Reaktor MAGNOX [17]

AGR

(Advanced Gas Cooled, Graphite Moderated Reactor)

AGR je pokročilý plynem chlazený a grafitem moderovaný reaktor. Ve Velké Británii vedla snaha o zlepšení výstupních parametrů chladiva k vývoji reaktoru typu AGR. Hlavními změnami bylo palivo, které je obohaceno na 2,3 % izotopu ^{235}U . Teplota na výstupu z reaktoru je 650 °C, které dosahujeme díky palivu, které je v povlakové trubce z nerezavějící oceli. Tlak chladicího plynu je 5,5 MPa. Při vývoji zde byly přidány i některé nové prvky, především uzavření celého primárního okruhu do betonové tlakové nádoby. [9, 11]



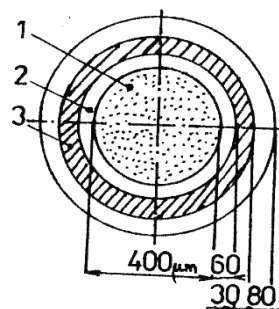
Obr. 3-8 Reaktor AGR [18]

HTGR

(High Temperature Gas Cooled Reactor)

Vysokoteplotní reaktor HTGR mají výborné teplotní charakteristiky a bezpečnostní parametry a proto patří mezi perspektivní typy. Reaktorem HTGR se zabývají pouze v Německu, Velké Británii a USA. Díky velmi vysoké teplotě chladiva na výstupu mohou být využity nejen k výrobě elektřiny, ale i v různých průmyslových procesech. Všechny základní složky primárního okruhu jsou umístěny uvnitř tlakové nádoby, která je zhotovena z předepjatého betonu. Předpětí je dosaženo pomocí systému ocelových lan. Palivo je u tohoto typu vysoce obohacený uran ve formě malých kuliček oxidu uraničitého (UO_2). Uran je obohacen izotopem ^{235}U na 93 %. Kuličky mají v průměru asi 5 mm, jsou povlékané třemi vrstvami karbidu křemíku a uhlíku a jsou rozptýleny v koulích z grafitu o velikosti zhruba tenisového míčku. Grafit slouží jako pevná, tepelně odolná schránka uranu i vznikajících radioaktivních zbytků i jako moderátor. Palivové koule se volně sypou přímo do aktivní zóny odkud se postupně ze dna odebírají. Aktivní zóna má rozměry 5,6 m v průměru a 6 m na výšku. Koncepce USA má místo koulí šestiúhelníkové bloky, které se skládají na sebe. Chladicím médiem je hélium, které je dmychadlem hnáno přes aktivní zónu. Dále proudí do parogenerátoru, kde předá teplo chladicí vodě sekundárního okruhu. Vzniká pára o vysokém tlaku i teplotě, která pohání parní turbínu, která je připojena na generátor elektrického proudu. Horké hélium může taky sloužit jako zdroj tepla pro jiné než energetické účely, například výroba vodíku. [9, 11]

- 1 – palivová částice
 - 2 – vrstva z porézního grafitu
 - 3 – vnější vrstvy z pyrolytického uhlíku
- [rozměry jsou v μm]



Obr. 3-9 Opláštěná částice paliva [9]

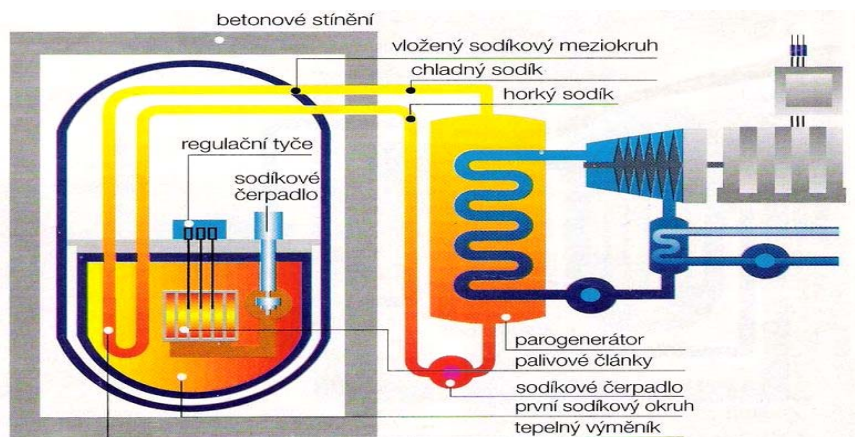
3.2.2 RYCHLÉ MNOŽIVÉ REAKTORY

Rychlé množivé reaktory jsou typy reaktorů, ve kterých štěpení jader paliva vyvolávají především tzv. rychlé neutrony. V těchto typech reaktorů není žádný moderátor a proto lze přebytku neutronů využít k přeměně ^{238}U , který není štěpitelný tepelnými neutrony na ^{239}Pu , který je štěpitelný tepelnými neutrony. Palivo pro rychlé reaktory musí být zajištěno vysokým obohacením o ^{235}U . Obohacení palivových článků v dnešní době pro rychlé reaktory je 20 % až 30 %, a u některých se palivo obohacuje i štěpitelným plutoniem (^{239}Pu), které si reaktor dříve vyrobil. Do reaktoru se vkládají i články množivé, které jsou ochuzené o uran, a ve kterých během provozu reaktoru vzniká štěpitelné plutonium. Rychlý množivý reaktor potřebuje velmi účinné chlazení, protože se v něm uvolňuje až desetkrát více tepla než u klasických pomalých reaktorů. Voda ani plyn, které chladí pomalé reaktory, by takové množství tepla nemohly odvádět a ke všemu voda zpomaluje neutrony. Chladicím médiem je proto lehký kov, sodík, který splňuje požadované parametry. Sodík má výbornou tepelnou vodivost a vysokou teplotu varu, okolo 900 °C při atmosférickém tlaku. Zásadním problémem sodíku je ale jeho velká chemická reaktivita s kyslíkem a s tím související nebezpečí požáru při jeho úniku. Musí se proto zajistit co nejbezpečnější oddělení sodíkového okruhu od vody i od vzduchu a také instalovat mimořádně spolehlivý protipožární systém.[9]

FBR-600

(Fast Breeder Reaktor)

Nemoderovaný rychlý množivý reaktor FBR není v současné době schopen ekonomicky konkurovat ostatním typům reaktorů. Produkování plutonia přímo v reaktoru stojí více než dobývání přírodního štěpitelného paliva. Nejvíce pokročila v tomto ohledu Francie a Rusko. Palivem je plutonium ve směsi oxidu plutoničitého a uraničitého. Palivové tyče tvoří válečky paliva uzavřené v obalové trubce z nerezavějící oceli. Aktivní zóna se skládá ze svazků těchto palivových tyčí, navíc je ještě obklopena plodícím pláštěm, který obsahuje uran ve formě UO_2 , opět v trubkách z nerezavějící oceli. Aktivní zóna je potopena v široké ocelové nádobě naplněné sodíkem. Horký sodík ohřátý v aktivní zóně je čerpán do výměníku tepla, který je rovněž uvnitř reaktorové nádoby. V tomto výměníku se předává teplo sekundárnímu okruhu, kde proudí rovněž sodík. Tento již neradioaktivní sodík proudí do parního generátoru, kde vzniká pára, která pohání turbínu připojenou na generátor elektrického napětí. Teplota sodíku na výstupu z reaktoru 545 °C, takže chladivo je na rozdíl od tlakovodních reaktorů hluboko pod bodem varu. To je z hlediska bezpečnosti výhodné. [9, 11]

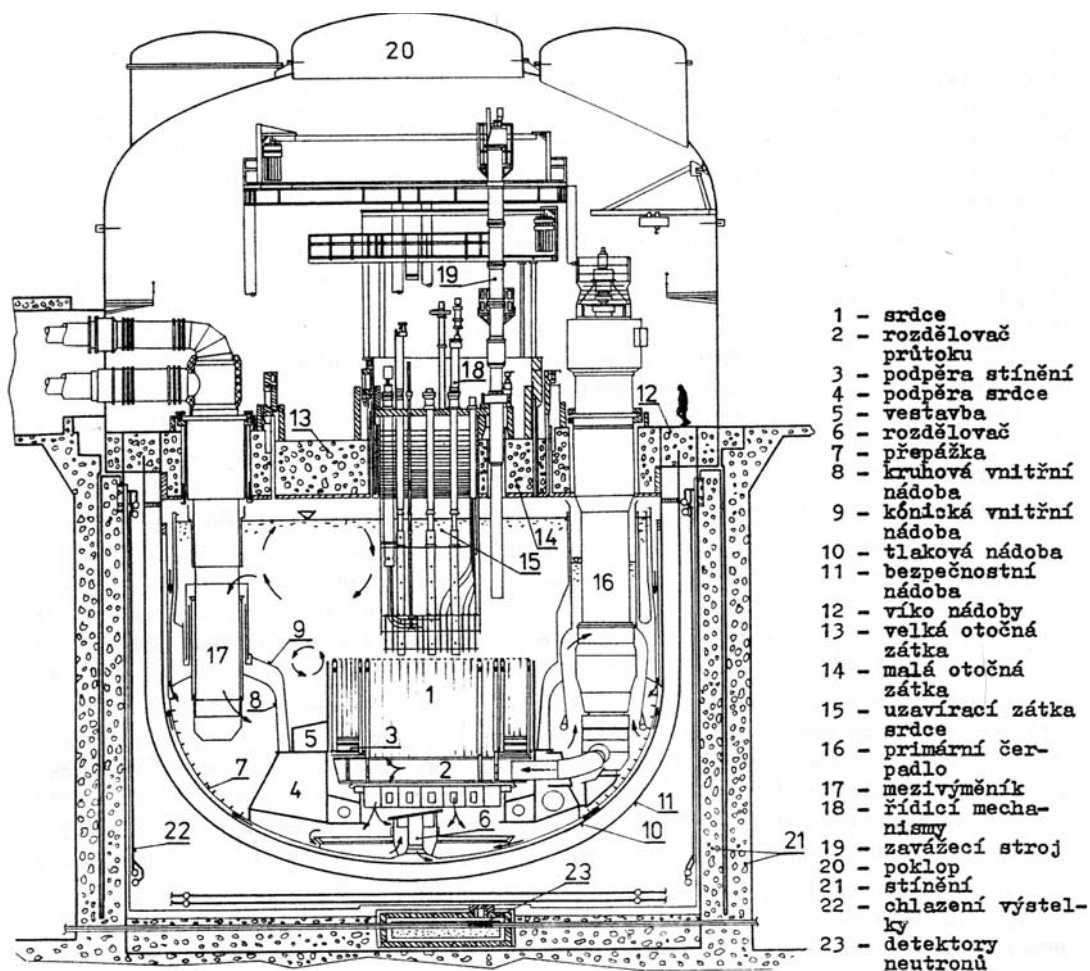


Obr. 3-10 Reaktor FBR-600 [19]

SUPERPHÉNIX (SUPERPHOENIX)

Projekční plány tohoto jedinečného reaktoru začaly ve Francii roku 1968. Stavba byla schválena roku 1972 a výstavba trvala 1974 – 1981, ale výroba elektřiny začala běžet až roku 1985. Během 11 let reaktor strávil 63 měsíců v běžném provozu, většinou však s nízkým výkonem, 25 měsíců ve výpadku v důsledku stanovení technických problémů prototypu a 66 měsíců byl zastaven z politických důvodů. Roku 1996 byl reaktor zastaven kvůli údržbě, ale po soudním řízení vedeném oponenty reaktoru, v červnu 1997 vláda oznámila uzavření reaktoru. V září 1998 byl závod uzavřen.

Hlavní nádoba reaktoru o průměru 21 m a výšce 20 m s náplní 3200 t sodíku obsahuje aktivní zónu, primární sodíkový okruh, ve kterém jsou čerpadla a výměníky a mechanismy pro manipulaci s palivem. Aktivní zóna obsahuje 358 palivových kazet, v každé z nich je 275 proutků s vnějším průměrem 8,65 mm s tabletami ze směsi oxidu uraničitého plus oxidu plutoničitého pro aktivní část a z ochuzeného oxidu uraničitého pro horní a dolní axiální plodivou část. Poslední palivové tyče byly odstraněny z reaktoru 18.března 2003, a jsou nyní uloženy v chladicích nádržích.



Obr. 3–11 Řez reaktorem SUPERPHÉNIX [9]

Reaktorová nádoba je nahoře uzavřena nosnou deskou, která je složena z vrstev oceli a betonu celkové tloušťky asi 3 m. Na desce jsou pevně spojena čerpadla a výměníky a nejsou vůči ní pohyblivé. Otočné zátky, které jsou umístěny na víku tak, aby jimi prostřednictvím

zavážecího mechanismu, které je uloženo v malé zátce, šlo transportovat kazety dovnitř nádoby, která je naplněna sodíkem. Primární okruh reaktoru je oddělen vnitřní nádobou na horký a studený sodík. Horký sodík teče po projití aktivní zónou reaktoru přes osm výměníků. Chladný sodík je přiváděn čtyřmi cirkulačními mechanickými čerpadly. Reaktor je vybaven čtyřmi sekundárními okruhy. Každý z nich je připojen ke dvěma mezivýměníkům. Sekundární sodíkové čerpadlo je umístěno v chladné větvi obou smyček. [9, 11]

BN-600 (BN-600)

Jediným energetickým reaktorem, který spolehlivě již léta dodává elektrickou energii do rozvodné sítě, je ruský reaktor BN-600, který je třetím blokem fungujícím v Bělojarské jaderné elektrárně. Elektrárna byla první, ve které pracovaly reaktory moderované grafitem. Byly dva a v současné době jsou už oba odstaveny.

Rychlý množivý reaktor BN-600, který je také označován jako Bělojarsk-3. K rozběhnutí stabilní řetězové reakce došlo 26. února 1980 a první energie byla do sítě dodána již 5. dubna 1980. Postupně se dosáhlo plánovaných hodnot tepelného výkonu 1470 MW a elektrického výkonu 560 MW. Práce reaktoru je stabilní a nyní se jeho výkon pohybuje mezi 580 až 610 MW. Jeho využití se pohybuje mezi 70 až 75 %, ztráty jsou dány hlavně plánovanými výměnami paliva a údržbou. Pouze zhruba 2 % nevyužité kapacity času a výkonu připadá na neplánované události. Do konce roku 2004 byla elektrárna v činnosti zhruba 170 000 hodin a dodala do sítě 91 milionů MWh. Nejčastěji se problémy u tohoto typu rychlých reaktorů objevují v souvislosti s chladicím systémem. Reaktor BN-600 měl pouze 12 úniků chladiva na parogenerátoru a z toho polovina se objevila v prvním roce. Celkově došlo k 27 únikům sodíku, některé i s menším požárem. Všechny však byly klasifikovány nejnižším stupněm na mezinárodní stupnici jaderných událostí a neměly vliv na provozování reaktoru. Jinak jsou zkušenosti s elektrárnou velmi dobré a cenné nejen pro ruskou jadernou energetiku.

Reaktorová sestava je umístěna v betonové budově a je vybavena zařízením, které zabraňuje úniku plynů. Jádro reaktoru má výšku 1,03 m a průměr 2,05 m. Obsahuje 369 palivových kazet. Obohacení paliva je 17 až 26% ^{235}U . Teplota sodíku dosahuje v reaktoru 550 °C. [20]



Obr. 3–12 Bělojarská jaderná elektrárna [20]

4 ZASTOUPENÍ JADERNÝCH REAKTORŮ VE SVĚTĚ

V současné době existuje 436 komerčních jaderných reaktorů provozovaných v 29 zemích o celkovém elektrickém výkonu 372 000 MW, čímž jaderné elektrárny pokrývají kolem 15 % z celkové světové spotřeby elektrické energie. Navíc je v 56 zemích provozováno asi 250 výzkumných reaktorů a dalších 220 reaktorů je používáno pro pohon v lodích a ponorkách. [21]

Tab. 4–1 Seznam jaderných reaktorů v provozu [22]

Reaktor typu	Hlavní země	Počet reakt.	GWe	Palivo	Chladicí kapalina	Moderátor
Tlakovodní reaktor (PWR)	USA, Francie, Japonsko, Rusko, Čína	265	251.6	obohacený UO_2	voda	voda
Varný reaktor (BWR)	USA, Japonsko, Švédsko	94	86.4	obohacený UO_2	voda	voda
Těžkovodní reaktor CANDU (PHWR)	Kanada	44	24.3	přírodní UO_2	těžká voda	těžká voda
Plynem-chlazený reaktor (AGR & Magnox)	Velká Británie	18	10.8	U přírodní (kov), obohacený UO_2	CO_2	grafit
Varný reaktor (RBMK)	Rusko	12	12.3	obohacený UO_2	voda	grafit
Rychlých množivý reaktor (FBR)	Japonsko, Francie, Rusko	4	1.0	PuO_2 a UO_2	sodík	žádný
Další	Rusko	4	0.05	obohacený UO_2	voda	grafit

V tabulce 4.1 můžeme vidět jaké mají zastoupení jednotlivé typy reaktorů. Největší zastoupení má tlakovodní reaktor PWR. Druhým nejpoužívanějším typem je varný reaktor BWR.

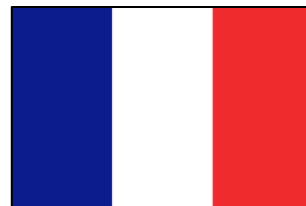
Spojené státy americké (United States of America – USA)



USA je největším světovým výrobcem jaderné energie, což představuje více než 30% celosvětové jaderné výroby elektřiny. USA má 104 jaderných reaktorů v 31 státech, které provozuje 30 různých energetických společností. V roce 2008 bylo v zemi vytvořeno 4119 milion MWh čisté elektrické energie, 49 % v uhelných elektrárnách, 22 % v elektrárnách na zemní plyn a 6 % pochází z vodních elektráren. Jaderná energie tvořila téměř 20 % celkové elektřiny vyrobené v roce 2008. V polovině roku 2007 proběhla žádost o licenci na vybudování 26 nových jaderných reaktorů a první z nich by měli být postaveny do roku 2018. Nových bloků by mělo přibýt 4 až 8.

Z celkových 104 jaderných reaktorů, které jsou v provozu k datu 1.dubna 2010 je 70 tlakovodních typu PWR a 34 varných typu BWR. [24]

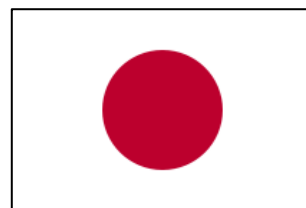
Francie (France)



Ve Francii pochází více než 75 % elektřiny z jaderné energie. Francie je největším světovým vývozcem elektřiny. Vyváží elektřinu pro Belgii, Německo, Itálii, Španělsko, Švýcarsko a Velkou Británii. Díky velmi nízkým nákladům na výrobu elektřiny v jaderných reaktorech získává Francie více než 3 miliardy EUR ročně. Tento stát se vyznačuje energetickou nezávislostí a téměř nejnižší cenou elektřiny v Evropě. Má také velmi malou produkci emisí (CO₂) na jednoho obyvatele z výroby elektřiny, protože více než 90 % elektrické energie pochází z jaderných nebo vodních elektráren.

Francie je v pořadí druhá, co se týče počtu jaderných reaktorů. Celkový počet jaderných reaktorů v provozu je 58, z nichž jsou veškeré tlakovodního typu PWR. Země je také známá svým výzkumem a výstavbou rychlých množivých reaktorů typu FBR a to Phénix a Superphénix. Oba reaktory jsou již uzavřeny. Phénix byl v provozu od roku 1973 až do roku 2009. Superphénix fungoval od roku 1986 do roku 1998, ovšem s častými přestávkami v provozu nebo na poloviční výkon. [24]

Japonsko (Japan)



Hlavním problémem Japonska je nedostatek fosilních paliv z vlastních zdrojů, a proto musí dovážet 80 % veškerých energetických surovin. Proto japonská vláda už v roce 1973, kdy Japonsko utrpělo ropný šok, vsadila na energii vyráběnou z jaderných reaktorů. Od tohoto roku byla národní strategickou prioritou, když byl první jaderný reaktor spuštěn v polovině roku 1966. Přesto, že Japonsko je jedinou zemí, která utrpěla devastujícími účinky jaderných zbraní ve válce, se chopila mírového využití jaderné technologie a ta jí poskytuje podstatnou část své elektrické energie. Dnes, jaderná energie představuje téměř 30 % země. Existují plány na zvýšení tohoto podílu až na 41 % do roku 2017. Nyní je však její podíl vyráběné energie 28 % z uhelných elektráren, 24 % ze zemního plynu, 15 % z ropy a 7 % z vodních elektráren.

Japonsko patří také mezi země, které mají zkušenosti s rychlými množivými reaktory, chtěli tím prakticky docílit nezávislost s ohledem na jaderné palivo. V současné době jsou však neekonomické, a tak je vývoj pozastaven. Japonsko se řadí na třetí místo v počtu jaderných reaktorů. Má jich dohromady 54 z nichž je 30 typu BWR a 24 typu PWR. [24]

Rusko (Russia)



Rusko se pyšní první jadernou elektrárnou světa Obninsk, která byla připojena k síti v roce 1954 a v roce 2004 byla uzavřena. Do poloviny roku 1980 mělo Rusko v provozu 25 jaderných reaktorů, ale černobylská havárie roku 1986 vedla k pozastavení výstavby dalších reaktorů. Mezi rokem 1986 a 1990 byla do provozu přivedena pouze jedna jaderná

elektrárna. V roce 2000 začala výstavba jaderných reaktorů a tím se výrazně zvýšila morálka ruské jaderné energetiky. Rusko neustále rozšiřuje roli jaderné energetiky a plánuje zdvojnásobení produkce do roku 2020.

Rusko je také jedna ze zemí, která se věnuje výzkumu a předpokládá, že rychlé množivé reaktory budou hrát stále větší roli už okolo roku 2025. V jaderné elektrárně Bělorajská jeden rychlý množivý reaktor typu FBR je v provozu už od roku 1980 a další je výstavbě. Rusko má celkový počet jaderných reaktorů 32 z čehož je nejvíce rozšířený tlakovodní typ VVER a po něm následuje varný reaktor typu RBMK s grafitovým moderátorem. [24]

Jižní Korea (South Korea)



Jižní Korea provozuje 20 jaderných reaktorů, které poskytují téměř 40 % potřebné elektřiny. Jaderná energie je strategickou prioritou pro Jižní Koreu a zvýšení kapacity se plánuje na 56 % do roku 2020 a do roku 2030 až na 71 %. Roku 2030 je naplánováno dokončit 18 nových jaderných elektráren, což tento cíl byl potvrzen vládou v březnu 2010.

Z 20 reaktorů má Jižní Korea 16 tlakovodních typu PWR a 4 zbylé typu CANDU. [24]

Velká Británie (United Kingdom)



Cílem Velké Británie je snížení skleníkových plynů až o 80 % a to do roku 2050. Nezbytné ke splnění tohoto cíle je mít k dispozici jadernou energii.

Velká Británie má 19 jaderných reaktorů, které vytvářejí až pětinu elektrické energie. Země se vyznačuje jadernými reaktory chlazenými plynem. Typ AGR má nejpočetnější zastoupení – 12 reaktorů. Starší typ plynem chlazený Magnox je ve Velké Británii 6krát. Zbylý jeden reaktor je tlakovodní typ PWR. [24]

Indie (India)



Cílem Indie je poskytovat jadernou energií 25 % elektřiny do roku 2050. Indie v důsledku svého zbrojního programu byla ve velké míře vyřazena z obchodu s jadernými zařízeními a materiálem, který brzdil její rozvoj v civilní jaderné energetice a to do roku 2009. Vzhledem k těmto omezením a nedostatku domácího uranu Indie vyvíjí jaderný palivový cyklus s využitím thoria, kterého má dostatek. Indie by se chtěla stát světovou velmocí v oblasti jaderných technologií, díky odborným znalostem a zkušenostech s rychlými reaktory s palivovými cykly na thorium.

Indie má dohromady 19 jaderných reaktorů, z čehož 2 jsou varné typu BWR a zbylé jsou tlakovodní typu PHWR. [24]

Kanada (Canada)



Kanada byla největším světovým producentem po mnoho let a představovala asi 22 % světové produkce, ale v roce 2009 ji překonal Kazachstán. Produkce pochází převážně z dolu McArthur River v severní provincii Saskatchewan, který je největší na světě. Produkce v Kanadě by měla opět výrazně vzrůst po roce 2011, protože uvede do chodu další důl. Pokračující průzkumy uvádí, že Kanada bude mít významnou roli při plnění budoucí světové poptávky.

Kanada je známá tím, že veškeré jaderné reaktory má těžkovodní typu CANDU. Celkový počet je 18 a další stejného typu jsou ve výstavbě. [24]

Německo (Germany)



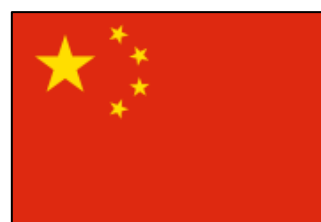
Německo přistupuje k jaderné energetice rozpolceně, ale přijímá ji především kvůli snížení emisí. Německo získává jednu čtvrtinu své elektrické energie z jaderných elektráren. Země má 17 fungujících reaktorů a poslední byl připojen k síti do komerčního provozu v roce 1989. Tlakovodní typ PWR má zastoupení 11ti reaktory a varný BWR 6ti reaktory. [24]

Ukrajina (Ukraine)



Ukrajina je silně závislá na jaderné energii. Jaderné reaktory, kterých má 15 jí vyrábí asi 47,5 % spotřebované elektřiny. Další asi 27,5 % pochází z uhelných elektráren, 20 % ze zemního plynu a 5 % z vodních elektráren. Většinu svého jaderného i fosilního paliva dováží z Ruska. Všechny jaderné reaktory má ruského tlakovodního typu VVER. [24]

Čína (China)



Čína většinu elektrické energie vyrábí z fosilních paliv, až 80 % v uhelných elektrárnách a také díky tomu Čína trpí nejvíce znečištěným ovzduším. V komerčním provozu má Čína 11 jaderných reaktorů a nejvíce na světě jich má 21 ve výstavbě. Do roku 2020 proto Čína očekává šestinásobný nárůst jaderné kapacity. Čína má 7 reaktorů tlakovodních typu PWR, 2 ruského typu VVER a 2 těžkovodní typu CANDU. [24]

Švédsko (Sweden)



Švédsko má 10 jaderných reaktorů, které poskytují více než 40 % potřebné elektřiny. Další více jak 40 % jí poskytují vodní elektrárny, jejichž výstup je závislý na ročním období a počtu

srážek. Cílem Švédska bylo zabránit nejistotě cen ropy a zvýšení bezpečnosti zásobování. Varný typ BWR má zastoupení 7mi reaktory a tlakovodní PWR zbylé 3. [24]

Španělsko (Spain)



První komerční reaktor ve Španělsku začal fungovat roku 1968. Roku 1950 byl objeven uran na území Španělska a od roku 1974 byla zahájena jeho těžba. Roku 2000 byla těžba pozastavena kvůli nízké ceně uranu, ovšem nyní se pomýšlí na obnovení těžby. V současné době má Španělsko 8 jaderných reaktorů, které generují asi pětinu elektrické energie. 6 z nich je tlakovodní PWR a zbylé 2 jsou varné BWR. [24]

Belgie (Belgium)



První komerční jaderný reaktor v Belgii začal fungovat v roce 1974. Na začátku roku 2003 však vláda zakázala další výstavby jaderných elektráren a omezila jejich životnost na 40 let bez dalších přepracování. Roku 2009 však od svých nařízení o přepracování upustila, však o výstavbě nařízení stále platí. Belgie má 7 jaderných reaktorů, které generují více než polovinu elektrické energie. Všechny jsou typu PWR. [24]

Česká republika (Czech Republic)



Jaderné elektrárny Dukovany a Temelín mají dohromady 6 jaderných reaktorů. Dukovany byly naší první komerční elektrárnou, a její reaktor byl spuštěn roku 1985. Mají 4 jaderné reaktory tlakovodního ruského typu VVER 440/213. Temelín je v provozu od roku 2000 a má 2 jaderné reaktory VVER 1000 typu V 320. České Republice vytváří jaderná energetika asi třetinu své poptávky. [24]

Švýcarsko (Switzerland)



Švýcarsko má 5 jaderných reaktorů, které vytváří 40 % elektřiny celkové spotřeby. 3 reaktory jsou typu PWR a 2 jsou varné typu BWR. První komerční reaktor byl spuštěn v roce 1969. [24]

Finsko (Finland)



Finské 4 jaderné reaktory pokrývají 27 % elektrické energie. Jaderné reaktory ruského typu VVER jsou 2, stejně jako varného typu BWR. Pátý reaktor byl schválen roku 2002, který je nyní ve

výstavbě a další se plánuje. [24]

Maďarsko (Hungary)

Maďarsko má 4 jaderné reaktory a generuje více než třetinu své potřebné elektřiny. Všechny jsou ruského tlakovodního typu VVER. První komerční reaktor začal fungovat roku 1982. Dva další jaderné reaktory jsou plánovány s naprostou podporou vlády. [24]



Slovenská republika (Slovakia Republic)

Roku 1972 Slovensko spustilo svůj první komerční jaderný reaktor. Slovensko má 4 jaderné reaktory typu VVER, které generují asi polovinu elektrické energie a 2 jsou již ve výstavbě. Další jsou plánované, poněvadž vláda k jaderné energetice přistupuje velmi kladně. [24]



Argentina (Argentina)

Argentina má 2 jaderné reaktory vytvářející téměř jednu desetinu potřebné elektřiny. Jeho první komerční reaktor začal fungovat v roce 1974. Dokončení třetího reaktoru se očekává na počátku roku 2011. Další jsou plánovány. Oba reaktory jsou těžkovodní typu CANDU. [24]



Brazílie (Brazil)

Brazílie má 2 jaderné reaktory, které vytváří 3 % potřebné elektřiny. Jsou tlakovodního typu PWR a výstavba dalších se chystá zahájit. První jaderný reaktor začal fungovat 1982. [24]



Bulharsko (Bulgaria)

Roku 1974 byl spuštěn první komerční jaderný reaktor. Nyní má Bulharsko 2 jaderné reaktory, které vytváří asi 35 % elektrické energie. Vláda má pozitivní vztah k otázce jaderné energetiky a tak už je pevně naplánována další výstavba jaderné elektrárny. Reaktory jsou typu PWR. [24]



Mexiko
(Mexico)



Vláda podporuje rozšíření jaderné energie, která by vedla ke snížení závislosti na zemním plynu. První komerční reaktor byl připojen k síti roku 1989. V současné době má Mexiko 2 jaderné reaktory a ty vytváří téměř 5 % elektrické energie. Oba reaktory jsou varného typu BWR. [24]

Pákistán
(Pakistan)



Pákistán má 2 jaderné reaktory, ale plánuje podstatně zvýšit jejich počet. Reaktory jsou tlakovodní PWR. Vzhledem k tomu, že má svůj program ve výrobě jaderných zbraní, je ve velké míře vyloučen z obchodu s jaderným zařízením a materiálem, což brání v jeho civilním rozvoji jaderné energetiky. [24]

Rumunsko
(Romania)



Rumunsko má 2 jaderné reaktory vytvářející téměř 20 % elektrické energie. Oba reaktory jsou těžkovodní typu CANDU. Rumunsko spustilo první komerční reaktor v roce 1996. Plány na dokončení dalších 2 reaktorů jsou v pokročilém stádiu. [24]

Jihoafrická republika
(South Africa)



Jihoafrická Republika má 2 jaderné reaktory, které vytvářejí 5 % potřebné elektřiny. Reaktory jsou tlakovodního typu PWR. První reaktor začal fungovat roku 1984. Další reaktory jsou naplánovány, ale finanční omezení brzdí jejich výstavbu. [24]

Arménie
(Armenia)



Arménie má pouze 1 jaderný reaktor a ten je spuštěn od roku 1976. Ačkoli má pouze jeden funkční reaktor, ten pokrývá okolo 40 % elektrické energie. Je typu VVER a další je schválen a do roku 2017 by měl být vystavěn. [24]

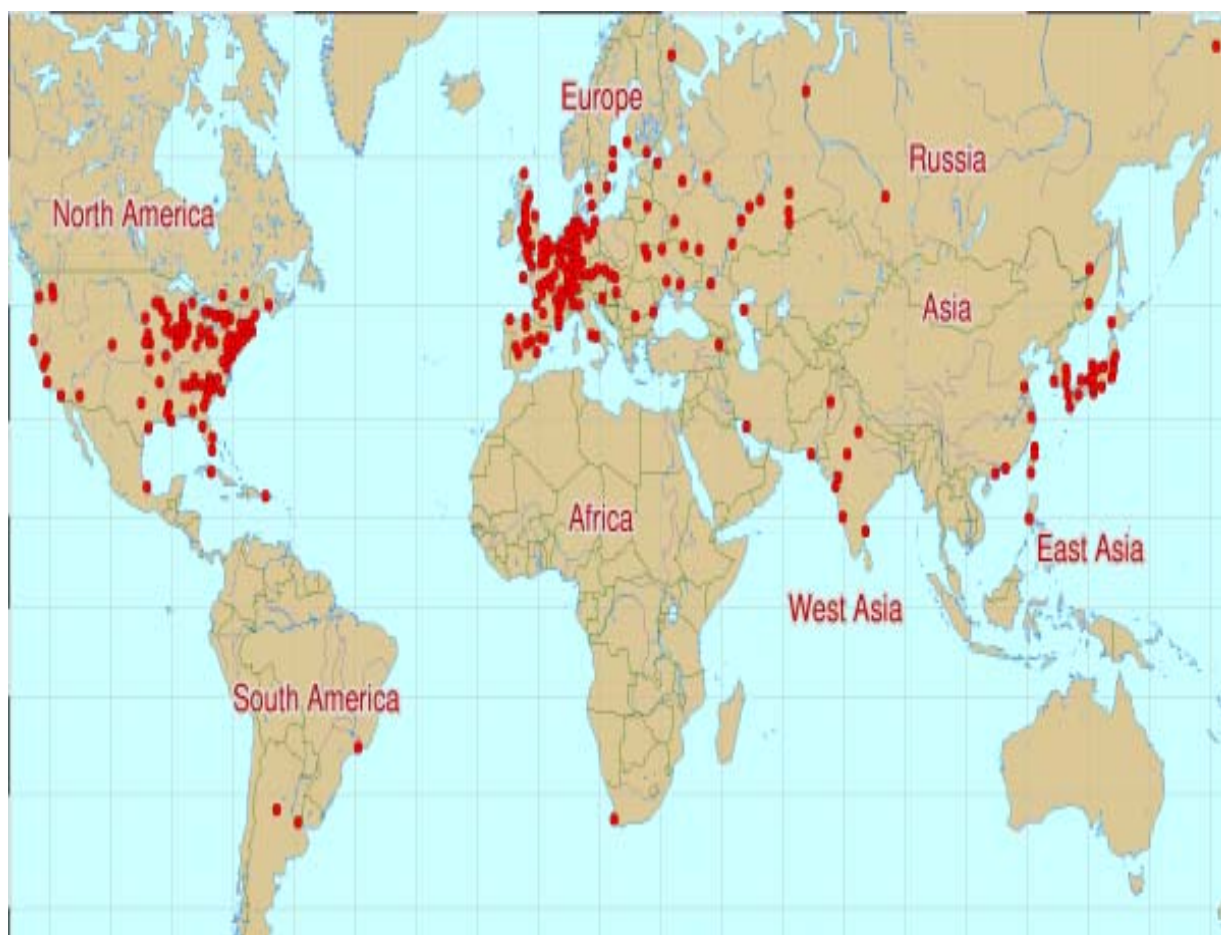
Nizozemsko (Netherlands)

Nizozemsko má 1 jaderný reaktor, který funguje od roku 1973 a ten vyrábí 4 % potřebné elektřiny. Navrhovaný je v současné době 1 reaktor. Funkční je tlakovodní PWR. [24]



Slovinsko (Slovenia)

Slovinsko má společný tlakovodní PWR reaktor s Chorvatskem od roku 1981. Slovinsko má asi 2 miliony obyvatel a v roce 2008 jaderná energie dodávala 40 % spotřeby elektřiny v zemi. Chorvatsko má okolo 4,5 milionů obyvatel a jaderná energie zemi dodává přibližně 15 % potřebné energie. Chorvatsko zvažuje výstavbu vlastního jaderného reaktoru. [24]



Obr. 4–1 Mapa světa jaderných elektráren [23]

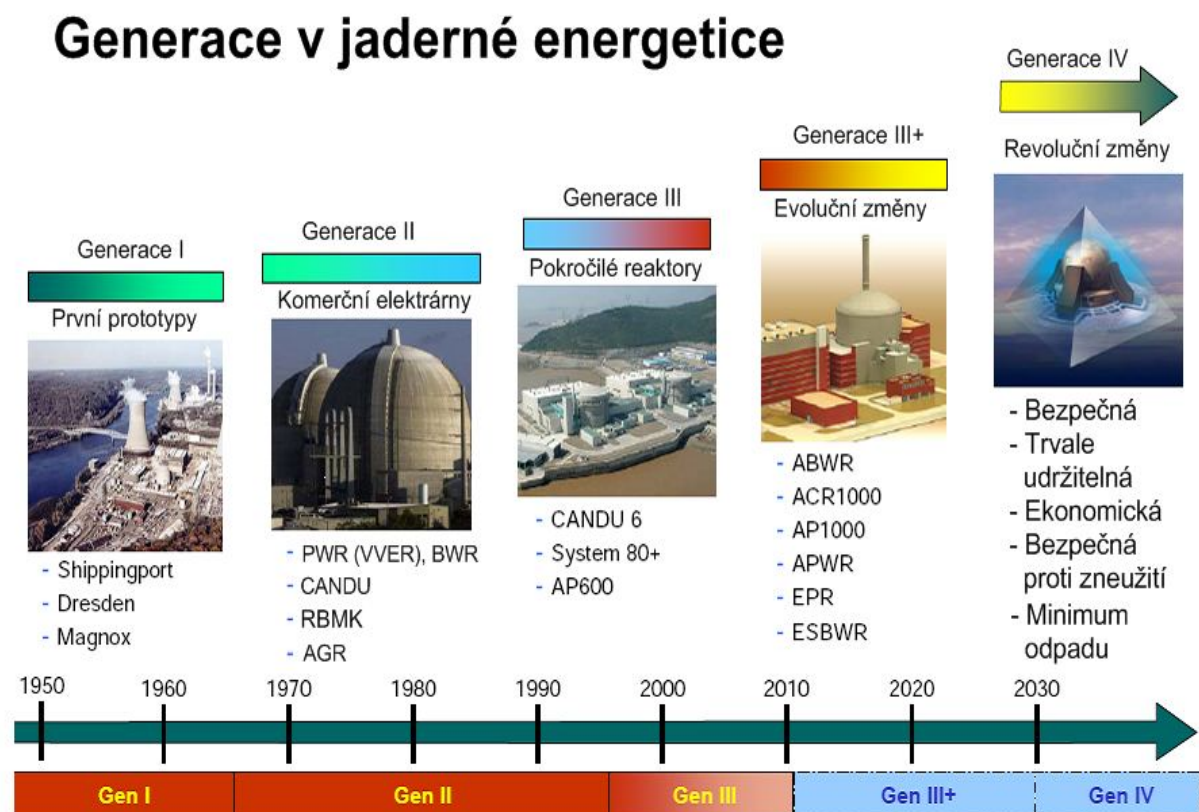
Tab. 4–2 Přehled států s jadernými reaktory

Stát	Počet reakt.	PWR (VEER)	BWR	CANDU (PHWR)	AGR / MAGNOX	RBMK	FBR
USA	104	70	34				
Francie	58	58					
Japonsko	54	24	30				
Rusko	32	16				15	1
Jižní Korea	20	16		4			
Velká Británie	19				16 / 4		
Indie	19		2	17			
Kanada	18			18			
Německo	17	11	6				
Ukrajina	15	15					
Čína	11	9		2			
Švédsko	10	3	7				
Španělsko	8	6	2				
Belgie	7	7					
Česká republika	6	6					
Švýcarsko	5	3	2				
Finsko	4	2	2				
Maďarsko	4	4					
Slovenská republika	4	4					
Argentina	2			2			
Brazílie	2	2					
Bulharsko	2	2					
Mexiko	2		2				
Pákistán	2	2					
Rumunsko	2			2			
Jižní Afrika	2	2					
Arménie	1	1					
Nizozemsko	1	1					
Slovinsko	1	1					

Ze sestaveného přehledu států s jadernými reaktory vyplývá, že USA má největší počet jaderných reaktorů. Druhou zemí v počtu jaderných reaktorů je Francie a těsně za ní Japonsko. Z přehledu je patrné, že jediná Velká Británie využívá plynem chlazených a grafitem moderovaných typů AGR a MAGNOX. Rusko jako jediné má typy jaderných reaktorů, které jsou grafitem moderovaný RBMK a rychlý množivý reaktor FBR.

5 III. a IV. GENERACE JADERNÝCH REAKTORŮ

Generace jaderných reaktorů jsou charakterizovány podle složení a v jakém chemickém i fyzikálním stavu je v daném typu reaktoru palivo a jaká látka je použita jako moderátor. Dalším důležitým údajem je typ média, které se používá k chlazení reaktoru a k přenosu tepla z aktivní zóny reaktoru do systému produkujícího elektrickou energii. Tím je totiž dána i teplota dosažitelná v provozní zóně. Čím vyšší je tato teplota, tím efektivnější je i přeměna tepelné energie na elektrickou.



Obr. 5–1 Přehled jednotlivých generací jaderných reaktorů [25]

K vlastnostem III. generace reaktorů ve většině případů patří to, že fungují spolehlivě a jsou ekonomicky výhodným zdrojem elektrické energie. Aby se však zabránilo jakýmkoliv možnostem havárie ohrožující zdraví lidí a zlepšila spolehlivost i ekonomika provozu elektráren, bylo potřeba navrhnout a připravit reaktory nové generace. Tyto reaktory většinou vycházejí z úspěšných modelů reaktorů generace II., ale mají daleko lepší bezpečnostní i užitkové vlastnosti. Jedná se o standardizované typy, což zjednodušuje povolená řízení při výstavbě elektrárny a celkově snižuje náklady a čas výstavby, protože právě náklady na výstavbu tvoří velkou část celkových nákladů. Jednodušší a robustnější konstrukce umožňuje zjednodušení provozu a větší odolnost proti lidským chybám. Lepší užitné vlastnosti a delší životnost, přičemž standardní by měla být šedesát let. Velmi silně redukovaná možnost nehod s roztavením jádra. Minimální vliv na životní prostředí. Zmenšení spotřeby uranu i objemu radioaktivního odpadu umožňuje vysoké vyhoření paliva. Kompenzovat zhoršování

vlastností by měly izotopy absorbující neutrony v palivu, které se v průběhu spalování odbourávají a jejich úbytek kompenzuje zhoršující se vlastnosti paliva. To umožňují prodloužení intervalu mezi výměnami paliva.

Z bezpečnostního hlediska je nejdůležitější důraz na pasivní bezpečnostní prvky. Řešení nestandardních či krizových situací probíhá automaticky na základě přírodních zákonitostí a nepotřebuje elektrický či mechanický zásah operátora či kontrolního systému. Je založeno na gravitaci, přirozeném proudění, odolnosti proti tlaku či teplotám. Kontejnment a celková konstrukce budov zajišťuje odolnost proti pádu letadla a dalším vnějším vlivům, jako jsou třeba zemětřesení nebo hurikány.

Generace III. je úzce propojená s generací III+ a je možné tyto generace spojit. K čisté generaci III. lze zařadit tři typy reaktorů, které jsou CANDU-6, Systém 80+ a AP600. Jsou v nabídce firem, zabývajících se stavbou jaderných elektráren, ale zatím nebyly postaveny.

V Kanadě se pokračovalo ve vylepšování reaktoru využívajícího těžkou vodu modelem CANDU-6. Vylepšená verze tohoto modelu, jejíž vývoj se v posledních letech dokončil, se už řadí mezi reaktory III. generace. Má výkon 750 MW, prodlouženou životnost na 60 let, zlepšené bezpečnostní vlastnosti, jednodušší ovládání a spolehlivější provoz.

Systém 80+ jsou tlakové lehkovodní reaktory. Jeho výhodou je to, že může jako palivo využívat i plutonium, což umožňuje spalování zbraňového plutonia. Tento typ upravila pro své potřeby Jižní Korea.

Posledním typem je lehkovodní tlakový reaktor střední velikosti AP600. Toto relativně malé zařízení s elektrickým výkonem 600 MW zatím nebylo objednáno a firma se soustředila na větší reaktor generace III+ AP1000.



Obr. 5–2 Návrh elektrárny s vylepšenou variantou reaktoru CANDU-6 [25]

Jako generace III+ se označují reaktory, které mají vylepšené prvky pasivní bezpečnosti tak, že se v případě nestandardní situace reaktor dostane do bezpečného stavu automaticky bez pomoci aktivních částí. Zároveň dochází k dalším vylepšením jejich energetických vlastností. V různém stupni rozpracovanosti je několik projektů tohoto typu reaktorů. Rozdělení reaktorů v rámci III. generace nemá úplně pevnou hranici. Pokročilý lehkovodní varný reaktor typu ABWR (Advanced Boiling Water Reactor), který začal pracovat v elektrárně Kashiwazaki-Kariwa v Japonsku, je na rozhraní mezi generací III. a III+. V této elektrárně jsou dva reaktory tohoto typu. Každý z nich má výkon 1356 MW. Spolu s dalšími v této elektrárně přežily 16. června 2007 velmi silné zemětřesení. I když intenzita zemětřesení

byla větší, než bral projekt do úvahy, zařízení se chovala jak přímo při zemětřesení tak i po něm velmi dobře. Reaktory se automaticky bezpečně vypnuly. Nyní se podrobně zkoumá vliv zemětřesení na všechny konstrukce a provádí se podrobné studium stavu elektrárny před opětovným spuštěním. Další reaktory tohoto typu se staví v Japonsku a dva na Tchaj-wanu.

V Evropské Unii se staví dvě zařízení, která už patří ke generaci III+ nesporně. Prvním je třetí reaktor finské elektrárny Olkiluoto, který je v pokročilém stupni výstavby a měl by být dokončen v roce 2011. Druhé takové zařízení se začalo budovat v roce 2007 jako třetí blok jaderné elektrárny Flamanville ve Francii, kde jsou už dva starší reaktory o výkonu 1330 MW. Jak ve Finsku tak ve Francii se jedná o reaktor typu EPR (European Pressurised water Reactor) s výkonem mezi 1600 až 1750 MW. Měl by být schopen využívat palivo MOX obsahující plutonium z přepracovaného vyhořelého paliva.

V Rusku se vyvíjí nový typ lehkovodního tlakového reaktoru na základě posledních osvědčených modelů VVER-1000, který by měl být hlavně vylepšený z bezpečnostního hlediska. Tento model VVER-1000 se staví v současnosti v Číně a Indii a dva takové bloky se plánují i pro bulharskou elektrárnu Belene. Typ VVER-1200 by měl splňovat parametry reaktoru třetí generace s velmi dobrými pasivními bezpečnostními prvky. Reaktor by měl mít dvojí kontajnement a kromě jiného i zvýšenou odolnost proti zemětřesení a pádu letadla. Poprvé by se měl uplatnit při stavbě jaderných elektráren Novovoronež II s plánovaným spuštěním v letech 2012-13 a Leningrad II se spuštěním v letech 2013-2014.

Tlakový lehkovodní reaktor je typ AP1000 a vychází z modelu AP600. Jedná se o reaktor s elektrickým výkonem 1117 MW. Jsou zde splněny všechny požadavky na pasivní bezpečnost pro reaktory generace III+. Přirozená cirkulace, gravitace a konvekce jsou využívány, aby se v případě nestandardní situace reaktor udržel v bezpečném režimu a vypnul se automaticky bez zásahu operátora. Dalšími bezpečnostními prvky jsou i velice pevný kontajnement a systém jeho chlazení. [25]



Obr. 5-3 Jaderná elektrárna Olkiluoto ve Finsku s reaktorem EPR vlevo (graficky doplněn) [25]

Nová tedy IV. generace reaktorů by měla umožnit ještě intenzivnější využití jaderné energetiky a zajistit ekologickým způsobem dostatek energie. Tomu jsou pochopitelně

podřízeny požadavky na ně. Ty se vztahují nejen na samotný reaktor, ale i na zařízení pro transformaci tepelné energie na elektrickou a všechny podpůrné provozy, například pro recyklaci vyhořelého paliva. Prioritou je pochopitelně bezpečnost jaderného reaktoru a celé jaderné energetiky.

V rámci mezinárodního programu reaktorů IV. generace vybráno šest perspektivních koncepcí reaktorů, které se budou rozvíjet. Rozdělení je dáno hlavně chladicím médiem, které se používá a v případě klasických reaktorů i materiálem, který je využit pro moderaci neutronů.

I. Reaktory s velmi vysokou teplotou

(VHTR – Very High Temperature Reactors)

Reaktory pracující s moderovanými neutrony. Pro moderaci se plánuje využití uhlíku. Jako chladivo by se využívalo helium. Reaktor by pracoval při velmi vysoké teplotě, zhruba 1000°. Ta by umožnila jeho využití k produkci vodíku i pomocí termochemických metod. Nepočítá se s využitím přepracovaného vyhořelého jaderného paliva. Při jeho konstrukci lze vycházet ze zkušeností získaných při konstrukci a provozování britských plynem chlazených reaktorů s grafitovým moderátorem Magnox a AGR.

II. Reaktory využívající vodu v superkritické fázi

(SCWR – Super Critical Water Reactors)

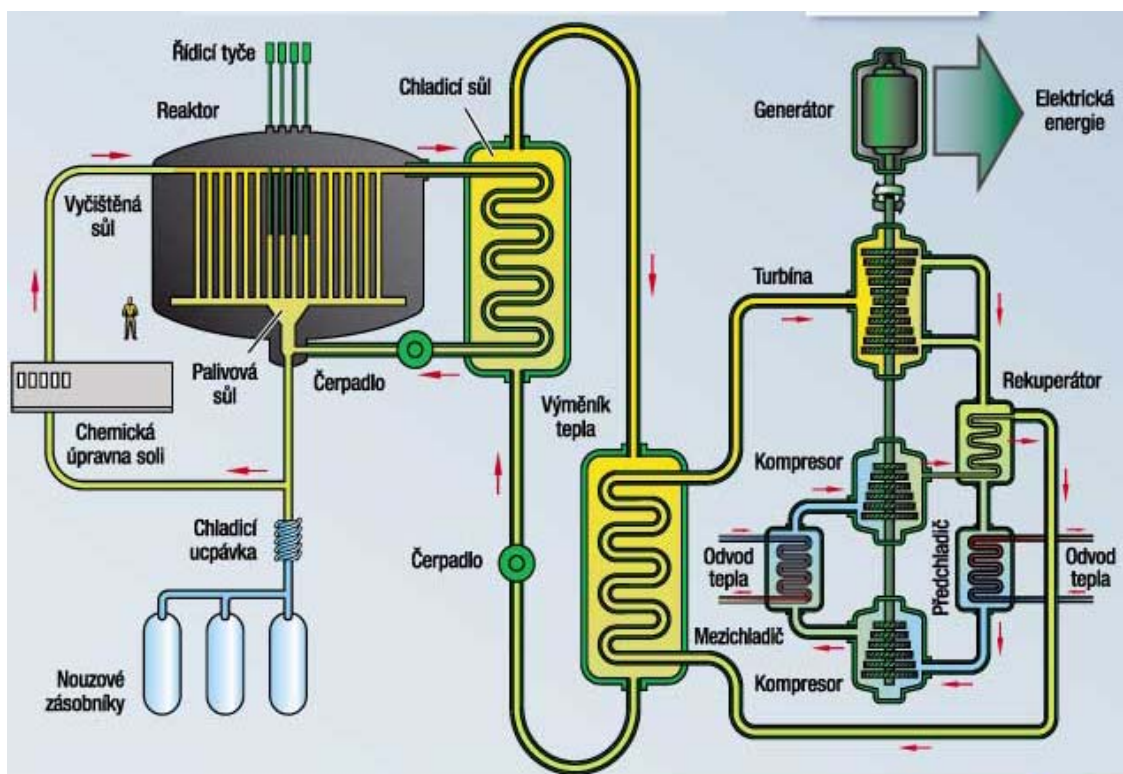
Jedná se o klasické reaktory s moderovanými neutrony. V tomto případě se jako moderátor i chladicí medium používá voda v superkritické fázi. Jedná se v principu o lehkovodní reaktor chlazený a moderovaný vodou za vysokého tlaku a teploty. Hodnoty teploty a tlaku překračují současně hodnoty pro superkritický bod ve fázovém diagramu, pro vodu to je 374,15 °C a 22,12 MPa. Konkrétně se uvažuje o teplotě mezi 510 a 550 °C a tlaku 25 MPa. V takovém případě je tekutina ve stavu jedné fáze a má částečně vlastnosti kapaliny i plynu. Výhodou využití vysoké teploty chladicího média je vyšší efektivita konverze tepelné energie. V daném případě se využitím vody v superkritickém stavu zvýší účinnost elektrárny z 33% na 45%. Výhodou tohoto typu reaktorů je, že je založen na dvou známých a dobře odzkoušených technologiích, lehkovodní reaktory varné a tlakové.

III. Reaktory založené na roztavených solích

(MSR - Molten Salt Reactors)

Tento typ reaktoru může v principu pracovat jak jako rychlý, tak i jako klasický reaktor. Jako palivo i chladivo by sloužily roztavené soli, uvažuje se například o fluorových solích. Představuje ve skutečnosti řadu různých potenciálních řešení, které se liší v použitém palivu, chladivu i spektru používaných neutronů. V jakém režimu bude daný reaktor pracovat, závisí na jeho konkrétní konstrukci.

Jedná se pravděpodobně o nejnáročnější typy reaktorů IV. generace.



Obr. 5–4 Schéma MSR reaktoru [26]

IV. Rychlé reaktory chlazené plynem (GFR – Gas-Cooled Fast Reactors)

Takové reaktory zatím také v provozu nejsou. I když lze využít řadu zkušeností získaných s klasickými plynem chlazenými reaktory. Jako chladivo by se používalo helium a pracovní teplota by byla zhruba 850 °C. Tato teplota by umožňovala efektivní produkci vodíku. Při výrobě elektřiny by plyn přímo poháněl plynovou turbínu. Jako palivo by se mohl používat i uran, ale efektivně by se spalovaly i transurany z vyhořelého jaderného paliva. V případě funkce v množivém režimu by část paliva byla v podobě ochuzeného uranu.

V. Sodíkem chlazené rychlé reaktory (SFR – Sodium-Cooled Fast Reactors)

Jedná se o rychlé reaktory, kde se jako chladivo bude využívat tekutý sodík. Pracovní teplota se předpokládá okolo 550 °C. Spektrum rychlých neutronů by umožnilo v množivém režimu efektivní produkci paliva z ^{238}U i velmi efektivní spalování jak plutonia tak i ostatních transuranů. Předpokládají se dvě varianty. Menší s výkonem 150 až 600 MW. Palivo by v tomto případě bylo v kovové podobě, obsahující uran, plutonium i další transurany. Větší zařízení by měla výkon mezi 500 až 1500 MW. Jako palivo se v tomto případě plánuje směs plutonia a uranu v podobě oxidů těchto prvků. V obou případech se uvažuje o různé formě přepracování paliva přímo v areálu elektrárny. Z rychlých reaktorů by měl být tento typ reaktoru k dispozici nejdříve, možná i před rokem 2030.

VI. Olovem chlazené rychlé reaktory (LFR – Lead-Cooled Fast Reactors)

S olovem chlazenými reaktory jsou také dlouholeté zkušenosti. Spolehlivě například fungují na ruských ponorkách. Pro chlazení se plánuje využívat olovo nebo eutektická směs olova a bismutu. Běžná pracovní teplota by měla být 550° . Při použití speciálních materiálů pro konstrukci chladicího okruhu by však pracovní teplota mohla být až 800° . Tyto vyšší teploty by umožnily termochemickou produkci vodíku pro vodíkové hospodářství. Palivo by bylo v kovové formě nebo ve formě nitridů uranu a plutonia. [27]

Masivní nasazení IV. generace jaderných reaktorů však nastane až v druhé polovině 21. století. Měly by umožnit v masivním měřítku využití ^{238}U a jeho přeměny na štěpný izotop ^{239}Pu . Hlavní důraz je kladen na rychlé množivé reaktory. Pokud je zkombinujeme s klasickými reaktory, budeme moci využívat jadernou energii i několik staletí.

6 ZÁVĚR

Hlavním úkolem této bakalářské práce bylo vytvořit přehled jaderných reaktorů a popsat princip činnosti a konstrukci vybraných typů jaderných reaktorů. Jaderné reaktory se dělí na dva hlavní typy a to na tepelné, ve kterých dochází ke štěpení tzv. pomalými neutrony a na rychlé, kde probíhá štěpná reakce pomocí rychlých neutronů. Většina komerčních reaktorů je v současné době tepelných, avšak ve výzkumech je kladem velký důraz na rychlé množivé reaktory, které by měly zajistit budoucnost energie dalším generacím. Mnoho jaderných reaktorů se již nevyrábí a nebo dosluhují a čekají na své nástupce. Zkušenosti s jejich provozem nám však pomohly ve vývoji a výzkumu nových bezpečnějších a účinnějších typech, kterými se zabývala další kapitola v této práci. Pojednání o reaktorech generace III. a IV. Tyto reaktory byly vyvinuty na základě zkušeností, které sbíráme už od poloviny 20. století, ale jde o úplně nové typy a koncepce, které se v současné době ještě nevyužívají.

Kapitola, která se zabývá přehledem a zastoupením ve světě ukazuje, že jaderná energetika má rozhodně svoje místo v současnosti, tak i v budoucnosti dodávané energie. Celkem 29 zemí využívá jadernou energii a mnoho dalších plánuje výstavbu jaderných elektráren. Také se zabývá počtem jaderných reaktorů, které jsou v provozu a jednoznačně z ní vyplývá, že nejpoužívanější reaktory jsou tlakovodní PWR. Některé země však využívají třeba jen jeden typ jaderného reaktoru, jako např. Kanada s typem CANDU nebo některé země jsou jediné, které ještě daný typ provozují, jako např. Velká Británie AGR a Magnox.

Budoucnost světové energetiky může být v jaderné energii, protože by mohla přinášet řešení mnoha problémů. Mezi nejzásadnější problémy patří, co možná nejmenší znečišťování životního prostředí, při výrobě energie a zásoba paliva pro provoz jaderných elektráren. A právě otázku zásoby paliva, by si měla jaderná energetika vyřešit sama, díky rychlým množivým reaktorům IV. generace, která by měla zajistit využití izotopu ^{238}U a jeho přeměnu na štěpný izotop ^{239}Pu . Rychlé reaktory, ale také potřebují ke svému provozu ^{235}U nebo ^{239}Pu , a proto musí dojít k jejich včasnému nastoupení, aby mohly zásobovat potřebným štěpným materiálem jak sebe tak i klasické tepelné reaktory. Vhodnou kombinací rychlých a klasických reaktorů tak můžeme dosáhnout perspektivy intenzivního využití jaderné energie na staletí až tisíciletí.

Psaní této rešeršní práce bylo pro mě velkým přínosem z hlediska získávání nových informací a poznání principů fungování velice prospěšných a důležitých tepelných strojů pro výrobu energie. Dle mého názoru bez jaderných elektráren by znečištění ovzduší bylo mnohonásobně větší a proto výzkumy a provoz jaderné energetiky by měly být hojně podporovány veškerými státy, které mají podíl na vývoji jaderné energetiky. Také si myslím, že jaderná energetika spolu s další ekologickou výrobou energie, jako je například energie z vodních elektráren, by mohla být řešením v otázce docházejících fosilních paliv.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Www.cez.cz* [online]. c2009 [cit. 2010-04-26]. Skupina ČEZ. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika.html>>.
- [2] *Www.duchacekvlese.cz* [online]. c2010 [cit. 2010-04-26]. Duháček v lese. Dostupné z WWW: <http://simopt.cz/energyweb/web/index.php?display_page=2&subitem=1&ee_chapter=3.2.7>.
- [3] *Www.wikipedia.cz* [online]. c1999 [cit. 2010-04-26]. Jaderná energie. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1_energie>.
- [4] *Www.cez.cz* [online]. 2010-02-01 [cit. 2010-04-26]. Skupina ČEZ. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/je-ve-svete.html>>.
- [5] *Www.cez.cz* [online]. c2009 [cit. 2010-04-26]. Skupina ČEZ. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/cs/pro-media/cisla-a-statistiky/energetika-v-cr.html>>.
- [6] *Www.cez.cz* [online]. c2009 [cit. 2010-04-26]. Skupina ČEZ. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/edu/technologie-a-zabezpeceni.html>>.
- [7] *Http://technet.idnes.cz* [online]. 2007-10-01 [cit. 2010-04-26]. Exkluzivní fotoreportáž z modernizace jaderné elektrárny Temelín. Dostupné z WWW: <http://technet.idnes.cz/exkluzivni-fotoreportaz-z-modernizace-jaderne-elektrarny-temelin-1fb-tec_reportaze.asp?c=A070827_101055_tec_reportaze_rja>.
- [8] *Www.wikipedia.cz* [online]. 2010-04-15 [cit. 2010-04-26]. VVER - Wikipedie, otevřená encyklopedie. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/VVER#VVER-440_typ_213>.
- [9] DUBŠEK, F. *Jaderná energetika*, Skripta VUT v Brně, Brno : PC-DIR spol. s.r.o. - Nakladatelství, Brno, Technická 2, 1997. 216 s.
- [10] *Www.duchacekvlese.cz* [online]. c2006 [cit. 2010-04-28]. Duháček v lese. Dostupné z WWW: <http://www.simopt.cz/energyweb/web/index.php?display_page=2&subitem=1&ee_chapter=3.2.6>.
- [11] Energie bez kouře. *Jaderná energie*. 1998, 2, s. 4.
- [12] *HTGR - Wikipedie, otevřená encyklopedie* [online]. 2008-04-19 [cit. 2010-04-28]. *Www.wikipedia.cz*. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:HTGR.jpg>>.
- [13] *Www.info-cernobyl.wz.cz* [online]. c2005 [cit. 2010-04-28]. Černobylská katastrofa. Dostupné z WWW: <<http://www.info-cernobyl.wz.cz/new/image/reaktor/pwr.gif>>.
- [14] *Www.wikipedia.cz* [online]. 2008-04-19 [cit. 2010-04-28]. CANDU - Wikipedie, otevřená encyklopedie. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:CANDU.jpg>>.
- [15] *Www.wikipedia.cz* [online]. 2008-04-19 [cit. 2010-04-28]. BWR - Wikipedie, otevřená encyklopedie. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:BWR.jpg>>.
- [16] *Www.wikipedia.cz* [online]. 2008-04-19 [cit. 2010-04-28]. RBMK - Wikipedie, otevřená encyklopedie. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:RBMK.jpg>>.

- [17] *Www.wikipedia.cz* [online]. 2008-04-19 [cit. 2010-04-28]. MAGNOX - Wikipedie, otevřená encyklopedie. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:MAGNOX.jpg>>.
- [18] *Www.wikipedia.cz* [online]. 2008-04-19 [cit. 2010-04-28]. AGR - Wikipedie, otevřená encyklopedie. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:AGR.jpg>>.
- [19] *Www.wikipedia.cz* [online]. 2008-04-19 [cit. 2010-04-29]. FBR - Wikipedie, otevřená encyklopedie. Dostupné z WWW: <http://images.google.cz/imgres?imgurl=http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/9b/FBR.jpg/180px-FBR.jpg&imgrefurl=http://cs.wikipedia.org/wiki/Mno%25C5%25BEiv%25C3%25BD_reaktor&usg=__XUU6U_vDDfHZHVbn9BnEGKK8HqM=&h=124&w=180&sz=9&hl=cs&start=7&um=1&itbs=1&tbnid=-yKSINylKFac8M:&tbnh=70&tbnw=101&prev=/images%3Fq%3DFBR%2Breaktor%26um%3D1%26hl%3Dcs%26lr%3D%26tbs%3Disch:1>.
- [20] *Www.osel.cz* [online]. 2008-04-09 [cit. 2010-05-01]. OSEL.CZ :: - Rychlý jaderný reaktor BN600 – spolehlivý civilní služebníček. Dostupné z WWW: <<http://www.osel.cz/index.php?clanek=3471>>.
- [21] *Www.ujv.cz* [online]. c2009 [cit. 2010-04-28]. Ústav jaderného výzkumu Řež a.s. Dostupné z WWW: <<http://www.ujv.cz/web/ujv/historie-jaderne-energie>>.
- [22] *Www.world-nuclear.org* [online]. 2010-04-01 [cit. 2010-04-28]. World Nuclear Association. Dostupné z WWW: <<http://www.world-nuclear.org/education/intro.htm>>.
- [23] *Http://morris108.wordpress.com* [online]. c1999 [cit. 2010-04-28]. Worlds Nuclear power plants as military targets. Dostupné z WWW: <http://images.google.cz/imgres?imgurl=http://morris108.files.wordpress.com/2009/02/world_map1.png%3Fw%3D635%26h%3D363&imgrefurl=http://morris108.wordpress.com/2009/02/27/picture-worlds-nuclear-power-plants-as-military-targets/&usg=__98xgJsG0zLqKz-CdKMFiRzIkJbg=&h=363&w=635&sz=131&hl=cs&start=1&um=1&itbs=1&tbnid=CwoSXRz-7TDpmM:&tbnh=78&tbnw=137&prev=/images%3Fq%3Dnuclear%2Breaktor%2Bworld%2Bmap%26um%3D1%26hl%3Dcs%26lr%3D%26tbs%3Disch:1>.
- [24] *Www.world-nuclear.org* [online]. 2010-04-01 [cit. 2010-04-29]. World Nuclear Association. Dostupné z WWW: <<http://www.world-nuclear.org/info/reactors.html>>.
- [25] *Www.osel.cz* [online]. 2008-05-04 [cit. 2010-04-30]. Reaktory III. generace. Dostupné z WWW: <<http://www.osel.cz/index.php?clanek=3531>>.
- [26] *Www.ekonom.ihted.cz* [online]. 2009-01-13 [cit. 2010-05-02]. Alkalická sůl nad zlato. Dostupné z WWW: <<http://ekonom.ihted.cz/c1-33176700-alkalicka-sul-nad-zlato>>.
- [27] *Www.osel.cz* [online]. 2008-05-16 [cit. 2010-05-02]. Reaktory IV generace. Dostupné z WWW: <<http://www.osel.cz/index.php?clanek=3568>>.

8 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obr. 2–1 Graf spotřeby elektřiny v ČR – dlouhodobý vývoj (1919-2008) [5]	12
Obr. 2–2 Graf spotřeby energie v ČR (1993–2008) [5]	12
Obr. 2–3 Princip uspořádání jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem [6]	13
Obr. 2–4 Prostorové uspořádání primárního okruhu [7]	14
Obr. 2–5 Jaderná elektrárna Dukovany [6]	15
Obr. 2–6 Palivový soubor reaktoru VVER 1000 [4]	16
Obr. 2–7 Jaderný reaktor [6]	17
Obr. 2–8 Řez jaderným reaktorem VVER [10]	18
Obr. 2–9 Model reaktoru v informačním centru Jaderné elektrárny Dukovany. [10]	18
Obr. 2–10 Řízená štěpná reakce [7]	19
Obr. 3–1 Reaktor HTGR (koncepce s betonovou tlakovou nádobou) [12]	20
Obr. 3–2 Technologické schéma reaktoru a) VVER 440 b)VVER 1000 [9]	22
Obr. 3–3 Reaktor VVER (PWR) [13]	22
Obr. 3–4 Reaktor CANDU [14]	23
Obr. 3–5 Reaktor BWR [15]	24
Obr. 3–6 Reaktor RBMK [16]	24
Obr. 3–7 Reaktor MAGNOX [17]	25
Obr. 3–8 Reaktor AGR [18]	26
Obr. 3–9 Opláštěná částice paliva [9]	26
Obr. 3–10 Reaktor FBR-600 [19]	27
Obr. 3–11 Řez reaktorem SUPERPHÉNIX [9]	28
Obr. 3–12 Bělojarská jaderná elektrárna [20]	29
Tab. 4–1 Seznam jaderných reaktorů v provozu [22]	30
Obr. 4–1 Mapa světa jaderných elektráren [23]	37
Tab. 4–2 Přehled států s jadernými reaktory	38
Obr. 5–1 Přehled jednotlivých generací jaderných reaktorů [25]	39
Obr. 5–2 Návrh elektrárny s vylepšenou variantou reaktoru CANDU-6 [25]	40
Obr. 5–3 Jaderná elektrárna Olkiluoto ve Finsku s reaktorem EPR vlevo (graficky doplněn) [25]	41
Obr. 5–4 Schéma MSR reaktoru [26]	43

9 SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1** Mapa jaderných elektráren Evropy [24]
- Příloha 2** Mapa jaderných elektráren USA [24]
- Příloha 3** Mapa jaderných elektráren Asie [24]
- Příloha 4** Mapa světa se zbylými jadernými elektrárnami [24]

